Deutſche Phyſik

in vier Bänden

Von

Philipp Lenard

in Heidelberg

Allen, die in wohlgegründeter Naturerkenntnis ihre geiſtige Ruhe ſuchen, zur Freude geſchrieben.

Vierter Band:

Magnetismus, Elektrodynamik und Anfänge von Weiterem

Mit 122 Abbildungen
und Regiſter zum Geſamtwerk

Dritte, vermehrte Auflage

J. F. Lehmanns Verlag / München-Berlin 1943

Urheber und Verleger behalten ſich alle Rechte,
insbeſondere das der Überſetzung in andere Sprachen, vor.
Copyright 1936 / J. F. Lehmanns Verlag, München.

Druck von Dr. F. P. Datterer & Cie., Freiſing-München.
Printed in Germany.

Inhalt des vierten Bandes.

Seite

Zweiter Teil der Lehre von der Elektrizität.

Vorbemerkung 3

I. Magnetismus.

Grundkenntnisse 4
Magnetische Erscheinungen. Magnete. Koerzitivkraft, Remanenz. Pole und Magnetismen, „Nord“ und „Süd“ einander entgegengesetzt, wie bei den Elektrizitäten. Coulombs Gesetz für Magnetismen. Magnetismen gibt es nicht. Elementarmagnete.

Magnetkraftlinien 8
Coulombs Gesetz nicht ausreichend. Gemeinsame Eigenschaften der magnetischen und der elektrischen Kraftlinien. Definition des Poles. Maß der Polstärke. Kraftlinien zwischen Magneten mit unveränderlichen Polen. Verhalten weichen Eisens im Magnetfelde. Permeabilität. Magnetischer Schutz. Magnetfeld im Inneren von Eisen. Überflüssige Begriffe. Unterschied zwischen elektrischen und magnetischen Kraftlinien. Der magnetische Fluß. Kraftlinien der Elementarmagnete. Veränderlichkeit der Permeabilität des Eisens.

Erdmagnetismus 20
Die Magnetnadel. Magnetische Deklination und Inklination. Horizontalkomponente des Erdmagnetismus. Kraftfeld der Erde.

Das System der absoluten Einheiten 22
Masse als Grundeinheit. CGS-System. Neue Krafteinheit, dyn. Elektrostatische und elektromagnetische Einheiten. Einheitspol. Magnetisches Moment. Einheit des Magnetfeldes. Messung der Horizontalkomponente des Erdfeldes. Messung anderer Magnetfelder.

Magnetische Energie 30
Magnetkraftlinien sind Linien der Energieverteilung im Äther, wie die elektrischen Kraftlinien. Magnetische Energiedichte. Berechnung von Kräften aus der Energie.

II. Elektrodynamik.

1. Die magnetischen Wirkungen elektrischer Ströme.

Ströme und Magnetnadel 33
Örsteds Entdeckung. Magnetische Kraft quer zum Leiter in seiner Umgebung. Magnetfeld eines geradlinigen Stromes. Kraft verkehrt proportional dem Abstand vom Stromleiter. Magnetfelder beliebig geformter Ströme. Stromelementen-Gesetz; Grenzen seiner Gültigkeit. Parallele gleichgerichtete Ströme. Entgegengerichtete Ströme. Kraftlinienzahl eines Stromes von der Umgebung abhängig. Kreisstrom.

Magnetische Strommessung 43
Tangentenbussole. Absolute elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Absolute Strommessung. Dimensionen. Technische Stromeinheit. QUS-Einheiten. Festhaltung der Stromeinheit. Mengeneinheit. Vervielfältigter Kreisstrom. Multiplikatoren. Mit geladenen Körpern bewegte Elektrizität und in Leitern strömende Elektrizität haben gleiche magnetische Wirkung. Elektrizitätsbewegung relativ zum Äther des Ortes ist maßgebend. Sicherung der Proportionalität von magnetischer Stromkraft und Stromstärke.

Seite

Messung von Elektrizitätsmengen mit dem Galvanometer. Verhältnis der elektrostatischen zur elektromagnetischen absoluten Elektrizitätsmengeneinheit.

Elektromagnete 53
Stromspulen, Solenoide. Die elektromagnetische Ohm-Gleichung. Feld der Stromspulen gleich dem von Stahlmagneten. Ampères Theorie des Magnetismus. Stromspulen und weiches Eisen. Elektromagnete mit Eisenkern. Höchste Magnetfeldstärken. Elektromotoren. Magnetismus aller Materie, Diamagnetismus.

Magnete und Ströme 66
Die Gegenkräfte zu den magnetischen Kräften der Ströme. Drehbewegung eines Stromleiters um einen Magnetpol. Kraft auf einen Stromleiter im Magnetfeld. Elektrizitätsleitung im Magnetfeld. Stromspulen im Magnetfeld. Kraftlinien des Stromes im Magnetfeld. Kräfte und Gegenkräfte im selben Raumelement.

Ströme und Ströme 71
Ströme in parallelen Leitern. Fernkraftgesetze versagen. Unmittelbare Einsicht durch die Kraftlinien. Kraftgröße paralleler Stromleiter. Kräfte an einer Stromspule und am einfachen Stromleiter. Drehmomente von Stromspulen.

2. Der elektrodynamische Zusammenhang 76
Magnetische Kraftlinien entstehen bei Bewegung elektrischer Kraftlinien. Modell des elektrodynamischen Zusammenhangs. Energiewanderung. Quantitativer Zusammenhang von elektrischem Feld, magnetischem Feld und Bewegungsgeschwindigkeit. Elektrische Kraftlinien entstehen bei Bewegung magnetischer Kraftlinien.

3. Induktion.

Grundkenntnisse 80
Induktion in geradlinigen Drähten. Kraftlinienschnitte. Induktion in Drahtspulen. Induktion durch Bewegung von Leitern. Magnetinduktion. Nur Schnitte mit Kraftlinien sind wirksam. Induktion schon im elektrodynamischen Zusammenhang enthalten. Induktionsgesetz. Andere Form des Induktionsgesetzes. Dritte Form des Induktionsgesetzes.

Verschiedene Induktionsvorgänge 87
Induktion in ganzem Leiterkreis. Magnetfeldmessung durch Induktion. Faradays Ring. Schlitteninduktor. Konaxiale Spulen. Webers Theorie des Diamagnetismus. Magnetische Drehung der Polarisationsebene des Lichtes; elektrische Doppelbrechung. Gedrehter Magnetstab, unipolare Induktion.

Erdinduktor; Volt, Ohm 91
Induktion durch die Erde. Erdinduktor. Festlegung der absoluten elektromagnetischen Spannungseinheit. Einführung der absoluten Widerstandseinheit und ihre Verwirklichung. Verwirklichung des Volt.

Selbstinduktion 96
Grundvorstellung. Selbstinduktion verschiedener Leiter. Extrastrom. Abzweigung des Extrastromes. Selbstinduktionskoeffizient. Koeffizient gegenseitiger Induktion. Ohms Gesetz bei veränderlichem Strom. Berechnung der magnetischen Energie elektrischer Ströme. Berechnung der magnetischen Energiedichte. Selbstinduktion als Trägheitserscheinung. Die Masse liegt im elektromagnetischen Feld. Entwickelung des elektromagnetischen Feldes.

Induktion und Energiegesetz 104
Stromerzeugung durch Induktion nur mit Arbeitsleistung möglich. Energieregel für Induktion. Wirbelströme. Magnetische Dämpfung. Energieumwandlung bei Induktion durch Bewegung. Vorgänge bei Induktion

Seite

durch Schließen und Öffnen von Strömen. Erzeugung stärkster Ströme durch Induktion. Induktionswirkung in Motoren. Elektrische Arbeitsübertragung.

Wechselstrom 111
Wechselstromerzeugung. Nachweis und Messung von Wechselströmen. Kraftlinienbewegungen der Wechselströme. Selbsttätige Induktionswirkungen der Wechselströme. Wirkung der Selbstinduktion im Sekundärleiter. Elektrodynamische Schirmwirkung. Hauteffekt. Energieübertragung von Leiter zu Leiter bei Wechselstrom. Wechselstromumformer. Einfluß der Selbstinduktion auf die sekundäre Stromstärke. Energieverbleib bei Stromschwächung durch Selbstinduktion und durch Widerstand. Energiebewegungen um eine Wechselstromspule. Verzweigung von Wechselstrom. Drehstrom. Erzeugung höchster Spannungen mittels Induktion. Energieübertragung auf große Entfernungen.

4. Elektrische Schwingungen und Wellen.

Schwingungen 122
Elektrizitätsbewegung in offenen Leitern. Schwingende Flaschenentladung. Schwingungsdauer. Wechselstromeigenschaften der Schwingungen. Großer Einfluß der Selbstinduktion, Induktionswirkungen auf andere Leiter. Geringes Folgen der Ionen bei großen Wechselzahlen. In sich geschlossene elektrische Kraftlinien. Induktion in Nichtleitern und im Äther. Nachweis des Eigenäthers beliebiger Körper. Maxwells Gleichungen. Magnetfeld veränderlicher elektrischer Kräfte gleich dem elektrischer Ströme. Geradlinige Schwingungsbahn. Nachweis schneller Schwingungen durch Resonanz.

Elektrische Wellen 134
Vorgegebene Kenntnisse. Drahtwellen. Stehende Wellen an Drähten. Verhalten der mit Lichtgeschwindigkeit querbewegten Kraftlinien. Verwandlungen und Bewegungen der Energie in den stehenden elektrischen Wellen. Freie elektrische Wellen. Reflexion der freien Wellen. Umkehr der Phase der elektrischen Kraft bei der Reflexion am „dichteren Medium". Stehende freie Wellen. Nachweis der Lichtgeschwindigkeit als Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen. Die freien Wellen nach Maxwells Gleichungen. Elektrische und magnetische Kräfte sind keine Fernkräfte. Elektrische Wellen ein häufiger Vorgang. Kraftlinien der stehenden freien Wellen. Strahlen elektrischer Kraft. Versuche über Durchlässigkeiten, Reflexion und Brechung. Die Wellen des Lichtes sind elektromagnetische Wellen. Die Atome als Oszillatoren und Resonatoren. Vervollständigung optischer Kenntnisse. Die chemischen Lichtwirkungen gehören den elektrischen Kräften der Wellen zu. Technische Anwendungen der elektrischen Wellen. Druck elektromagnetischer Wellen, Lichtdruck. Masse der Energie. Kräfte und Gegenkräfte an Energiemassen. Allgemeine Gesetze der Mechanik gültig auch für nicht materielle Energiemassen. Gewicht der Energie.

III. Anfänge von Weiterem: Neuere Strahlungen und die Folgen ihrer Kenntnis.

Übersicht 162

1. Kathodenstrahlen.

Neue Anfänge aus alter Kenntnis 162
Elektrische Entladung in verdünnten Gasen. Kathodenstrahlen. Unabhängigkeit der Strahlen. Wärmewirkung, Krümmung im Magnetfeld. Reine Versuche mit Kathodenstrahlen. Diffusion der Kathodenstrahlen in der Materie. Atomdurchquerung. Massenproportionalität der Diffusion. Kathodenstrahlen als Mittel zur Erforschung der Atome. Vorhandensein elektromagnetischer Felder im Atominneren. Geordnete Diffusion; Interferenz-ähnliche Erscheinungen. Absorption der Kathodenstrahlen. Massenproportionalität der Absorption; Abweichungen davon. Absorption und

Seite

Diffusion. Bedeutung der Massenproportionalität: Alle Atome aus einerlei Stoff bestehend.

Natur der Kathodenstrahlen 173
Keine bewegte Materie. Reine Versuche über magnetische und elektrische Ablenkung der Strahlen. Schlüsse aus den Ablenkungen. Verhältnis von Ladung zu Masse der Strahlen und ihre Geschwindigkeit. Elektrizität an sich, ohne Materie. Kathodenstrahlen machen die Luft elektrisch leitend. Auffangung der elektrischen Ladung der Kathodenstrahlen. Die Elektronen. Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit. Abänderung der Geschwindigkeit der Strahlen. Ursprungsort der Kathodenstrahlen in Entladungsröhren. Voltmaß der Elektronengeschwindigkeit. Direkte Geschwindigkeitsmessung der Kathodenstrahlen. Kathodenstrahlen als Äthervorgänge.

Lichtelektrische Wirkung 185
Erste einfache Beobachtungen. Entstehung von Kathodenstrahlen durch Licht; das Licht befreit sehr langsame Elektronen aus Materie. Entweichende Elektrizitätsmenge proportional der Lichtintensität, lichtelektrische Photometrie. Anfangsgeschwindigkeiten der Elektronen uneinheitlich, jedoch unabhängig von der Intensität des wirkenden Lichtes, nur abhängig von der Wellenlänge. Lichtelektrische Wirkung auf Gase. Ursprung der Energie der lichtelektrischen Wirkung. Elektronenabtrennungsarbeit und Spannungsreihe. Lichtelektrische Wirkung kürzester Wellen. Lichtelektrische Wirkung in gaserfülltem Raum.

Langsame Elektronen 190
Lenkbarkeit durch schwächste Kräfte. Glühelektrische Wirkung. Technische Anwendungen: Gleichrichtung von Wechselströmen; Verstärkung sehr schwacher Wechselströme; Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen, Funkwesen, Quarzuhr.

Schnellste Elektronen 193
Steigen der Masse des Elektrons mit seiner Geschwindigkeit. Lichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit. Das Steigen der Masse ist Folge der Energieaufnahme bei der Beschleunigung. Anwendbarkeit des Grundgesetzes der Dynamik auf das Elektron erwiesen. Kraftfeld des bewegten Elektrons. Plötzlich beschleunigte und wieder zur Ruhe gebrachte Ladung. Energie des bewegten und des ruhenden Elektrons nach Maxwells Gleichungen. Ruhmasse des Elektrons auch nur Energiemasse. Räumliche Abmessung des Elektrons.

Das Zusammenwirken bewegter Elektronen mit Atomen 199
Übersicht der möglichen Ereignisse. Durchquerung mit Geschwindigkeitsverlust und Richtungsänderung. Stufenweise Energieverluste und Richtungsänderungen. Absorption bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Absorbierende Querschnitte der Atome. Elektromagnetische Kraftfelder in der Umgebung der Atome und viel leerer Raum innerhalb der Atome nachgewiesen. Echte und unechte Absorption; Reflexion. Sekundärstrahlung. Elektronen als Bestandteile elektrisch neutraler Atome nachgewiesen. Sekundäre Geschwindigkeit. Menge der Sekundärstrahlung nahe massenproportional. Abhängigkeit der sekundären Menge von der primären Geschwindigkeit. Trägerbildungsspannung. Differentiale und totale Sekundärstrahlung. Sekundärstrahlung an festen Körpern. Verbleib der Energie der Kathodenstrahlen. Teilweiser Übergang in die Energie der Sekundärelektronen. Lichterregung durch Kathodenstrahlen. Entstehung von Hochfrequenzstrahlen. Nachweis der Wellennatur der Hochfrequenzstrahlen und Ermittelung ihrer Wellenlängen. Eigenschaften der Hochfrequenzstrahlen. Aussendung der Hochfrequenzstrahlung von der Antikathode; kontinuierliches Spektrum und Linienspektrum. Schwingungszahlen nahe proportional dem Quadrate der Ordnungszahlen der aussendenden Atome.

Seite

Elektrizitätsleitung in Gasen 210
Elektrizitätsträger. Größenermittelung der Träger durch Messung ihrer Wanderungsgeschwindigkeit. Trägerbildung durch Sekundärstrahlung. Wiedervereinigung der Träger. Zahl der Träger in der Volumeinheit stets sehr gering. Träger entstehen anders als Jonen. Trägerbildung durch Wellenstrahlung. Größen der Träger. Trägerbildung in heißen Gasen. Metallhaltige Flammen. Wechsel der Zustände der Metallatome in der Flamme. Abgabe freier Elektronen aus den Metallatomen. Nähewirkung. Metallische Leitung und Supraleitung. Freie Elektronen in kalten Gasen von gewöhnlichem Druck. Erscheinungen in den Entladungsröhren; selbständige Entladung. Entstehungsweise der Kathodenstrahlen an der Kathodenoberfläche. Kanalstrahlen. Die positive Säule. Übergang zur Funkenentladung. Spitzenentladung. Elektrischer Bogen. Zusammenfassendes über Bildungsweise und Beschaffenheit der Träger. Sehr große Träger; kleinste Träger. Mehrfach geladene Träger. Jonen und Träger. Sichtbarmachung von Trägern durch Dampfkondensation. Natur der Kanalstrahlen; positive Strahlen. Massenspektroskopie; Isotope. Deuterium. Axialität der Lichtemission. Doppler-Effekt bei Kanalstrahlen.

Die Atome 226
Wohlgesicherte Grundkenntnisse. Relative und absolute Gewichte der Atome. Durchmesser der Atome. Einfluß der Wärmebewegung auf das Atominnere. Kräfte in der Umgebung der Atome; Gravitation, Molekularkräfte und chemische Kräfte. Verhalten der Atome als elektrische Oszillatoren und Resonatoren. Quantenmäßiges Arbeiten. Leuchterregung und Lichtaussendung. Die Atome zusammengesetzt aus Elektronen und positiven Elektrizitätsquanten. Zerfall von Atomen. Dynamiden Bestandteile aller Atome in einer dem Atomgewicht proportionalen Zahl. Das Proton und Positron. Art der Raumerfüllung der Atome. Räumliche Ausdehnung der starken Teile der Kraftfelder der Dynamiden sehr klein. Bewegungen der Elektronen im Atom. Magnetismus. Auskunftserteilung durch die α-Strahlen. Kerne der Atome. Nahe die ganze Masse des Atoms im Kern enthalten. Atombilder. Verschiedene Dynamiden der Atome. Neutronen. Unterschiede der Isotopen. Rechnungen über das Atominnere. Weiter verfügbare Erfahrung. Kraftfelder des Atominneren. Lichtemission in magnetischen Feldern und in elektrischen Feldern, Beobachtungen an Atomstrahlen als Mittel zu weiterem Vordringen.

2. Radioaktivität.

Die radioaktiven Strahlungen 238
Uranstrahlen. Radium. Natur der radioaktiven Strahlungen. α-, β-, γ-Strahlen. Ursprung der Energie der Strahlen.

Atomzerfall 242
Die Strahlungen bedeuten Atomzerfall. Die radioaktiven Atome aus innerlichen Ursachen unbeständig. Der Kern als Hauptsitz von Masse und Energie. Zerfallsreihen. Radiumzerfall. Radium-Emanation. Zerfallskonstante, Halbwertszeit. Aktiver Niederschlag. Radium A, B, C. Verzweigung der Zerfallsreihe. Polonium. Übergang in Blei. Zerfallsreihe des Thor. Uranzerfall. Jonium und Aktinium. Radioaktives Gleichgewicht. Alter der Erdrinde.

Änderungen der Eigenschaften der Elemente beim Zerfall 250
Darstellung des Verhaltens durch die Atomtabelle. Art der radioaktiven Umwandlung und Wechsel der chemischen Eigenschaften. Veränderungen des Atominneren beim Zerfall. Periodischer Wechsel der Valenzen mit steigender Ordnungszahl. Radioaktive Isotopen.

Umwandlung von Elementen durch äußeren Einfluß 254
Befreiung von Protonen durch α-Strahlen. Umwandlung des Stickstoff-

Seite

atoms. Befreiung von Protonen durch Kathodenstrahlen. Protonenstrahlen, Deuteronenstrahlen. He-Kerne beständige Gruppen. Neutronenstrahlen, Ur-Spaltung.

Strahlungen im Himmelsraum 257
Nordlicht. Leitfähigkeit der Atmosphäre. Durchdringende Strahlung.

3. Energie, Gravitation, Äther 259
Energie elektromagnetischer Kraftfelder außerhalb und innerhalb der Atome. Gemessene Energie aus dem Atominneren. Nachweis des Gewichtes der Energie. Alle Massen als Energiemassen betrachtet. Trägheit Eigenschaft der Energie und nur dieser. Energie und Äther. Gravitation, so wie Trägheit, eine Eigenschaft der Energie, vermittelt durch deren Äther. Einzelbetrachtung der Formen der Energie. Alle Energie elektromagnetisch bedingt. Besondere innere Beschaffenheit der Energie angezeigt. Sitz der Energie. Trägheitsenergie (kinetische Energie), wie alles Geschwindigkeitsbedingte, nach Definition stets relativ. Die Energie des Lichtes rein kinetisch. Gravitationsenergie. Übergang von Gravitationsenergie in Trägheitsenergie innerhalb der Kraftfelder der Atome. Zusatzenergien (kinetische Energie, Gravitationsenergie, chemische Energie) meist geringfügig. Energiewanderungen. Äther und Geisterwelt.

Anhänge.

Anhang E II. Ballistisches Galvanometer 271
Anhang E III a. Induzierende Wirkung eines sinusförmigen Wechselstromes . . 274
Anhang E III b. Stromstärke bei sinusförmig schwankender elektromotorischer Kraft 274
Anhang E III c. Verhältnis der Stromstärken in den beiden Spulen eines Wechselstromumformers 275
Anhang E IV. Elektrische Schwingungen 275
Anhang E Va. Maxwells Gleichungen 277
Anhang E Vb. Elektromagnetische Wellen nach Maxwells Gleichungen 281
Nur Transversalwellen. Ausbreitungsgeschwindigkeit im materiefreien Raum gleich der als Einheitsverhältnis gemessenen Lichtgeschwindigkeit. Wellen um einen geradlinigen Oszillator. Vergleichung mit elastischen Wellen. Ausbreitung von Spannung und Strom an einer Leitung.
Anhang E Vc. Wanderungen der Energie nach Maxwells Gleichungen 287
Anhang E VI. Masse und kinetische Energie bei großen Geschwindigkeiten . . . 290
Beschleunigung einer Masse durch ihr zugeführte Energie. Kinetische Energie einer Masse von gegebener Geschwindigkeit. Kinetische Energie eines Elektrons und ihr Voltmaß.
Anhang E VII. Strahlabsorption 292
Nachschlageverzeichnis (Register) zum Gesamtwerk 293

Bei den in allen vier Bänden zahlreichen, meist in Klammern gesetzten Hinweisen bedeutet:

M = Mechanik (Bd. I),
A = Akustik (Bd. II),
W = Wärmelehre (Bd. II),
O = Optik (Bd. III),
E = Elektrizitätslehre (Bde. III und IV).

Die Zahlen bedeuten stets Absatznummern. Hinweise ohne Buchstaben beziehen sich auf denselben Teil.

Zweiter Teil der Lehre von der Elektrizität:

Magnetismus, Elektrodynamik und Anfänge von Weiterem.

Vorbemerkung.

Wir beginnen hier mit dem Studium des *Magnetismus*, um daran die Untersuchung der *magnetischen Wirkungen der elektrischen Ströme* zu schließen. Die beiden anderen Stromwirkungen, die *chemischen* und die *Wärmewirkungen*, sind bereits im III. Bande behandelt (171, 212).

Aus der Kenntnis der magnetischen Stromwirkungen hat sich der *Hauptteil der Elektrodynamik* — der Lehre von der bewegten Elektrizität — entwickelt mit dem umfassenden *Zusammenhang von Elektrizität und Magnetismus*, der über die Induktion zu den elektrischen Schwingungen und Wellen geführt hat. Wir zeigen als zusammenfassendes Hauptstück der Elektrodynamik eine einfache Vorstellung: den „*elektrodynamischen Zusammenhang*", dessen Inhalt auch über Maxwells Gleichungen hinausgeht.

Weitere, neuartige, für das Verstehen der elektrischen Erscheinungen grundlegend gewordene Kenntnisse lieferte das Studium schon früh entdeckter aber erst durch viel spätere Untersuchung verständlich gewordener *Strahlungen elektrischen Ursprungs*, voran der Kathodenstrahlen, die wir mit allem, was weiter daraus folgte, im letzten Abschnitt als „*Anfänge von Weiterem*" behandeln[1]). Dazu gehört auch einige teils schon gesicherte Kenntnis vom *Atominneren* und die umfassende Kenntnis von den *radioaktiven Umwandlungen* der Atome.

Den Schluß bildet ein Überblick dessen, was über die drei großen Dinge der Erkenntnis aus der materiellen Welt: *Energie*, *Gravitation*, *Äther* nach bisherigem Wissen etwa gesagt werden kann.

[1]) Dieser Abschnitt kann in der Tat nur „Anfänge" bringen, weil die zugehörige Kenntnis — beispielsweise besonders vom Atominneren — keineswegs fertig ist. „Naturerkenntnis ist ausnahmslos auf dem langsamen Wege stufenweiser Vervollkommnung mit allmählich steigender Sicherheit gewonnen; nur was alt und daher genügend erprobt ist, verdient somit überhaupt Kenntnisnahme in weiteren Kreisen" (Vorwort S. XII Bd. I). Wir gehen im Schlußabschnitt sogar ein wenig hinaus über dieses Programm; doch kann Denjenigen ein Erstaunen über unsere Einschränkungen nicht erspart werden, die Rechenergebnisse aus willkürlichen Annahmen mit Zuziehung einiger Beobachtungen schon für Naturerkenntnis halten.

I. Magnetismus.

Grundkenntnisse.

229. „Magnetische" Erscheinungen waren lange bekannt, als etwas Besonderes, ehe ein Zusammenhang mit den elektrischen Erscheinungen erkennbar wurde, und die Kenntnis vom „Magnetismus" hat sich eine lange Weile alleinstehend neben der von der Elektrizität entwickelt. Wir gehen jetzt zu diesen Anfängen, ins Altertum.

Bei der Stadt Magnesia in Lydien in Kleinasien wurde ein Eisenerz gefunden, an dem die Eigenschaft auffiel, kleine Eisenstücke an sich zu ziehen und festzuhalten. Auch anderswo gefundene Eisenerze (Eisenoxyduloxyd, Fe_3O_4) zeigten manchmal solches Verhalten; sie wurden dann, nach jenem besonderen Fundort, „magnetisch" genannt.

Hält man ein Stück weichen Eisens an einen solchen „Magnetstein", so nimmt es selber die Eigenschaft an, Eisenfeile anzuziehen; es wird selber magnetisch, verliert aber die Eigenschaft wieder, läßt die Eisenfeile fallen, wenn es vom Magnetstein abgetrennt wird. Stahl (hartes, wenig kohlenstoffhaltiges Eisen) verhält sich insofern anders, als er schwerer magnetisch wird — „Koerzitivkraft" zeigt —, daß er aber auch dauernd magnetisch bleibt — „Remanenz" zeigt. Um die Koerzitivkraft zu überwinden, streicht man den Stahl wiederholt mit dem Magnetstein; man erhält so künstliche „Magnete" aus Stahl. Diese und die weiteren zum Teil schon früh bemerkten Tatsachen untersuchte eingehend zuerst Gilbert (1600).

230. Pole und Magnetismen. — Die Kraft, mit welcher Eisenfeile von natürlichen oder künstlichen Magneten angezogen und festgehalten wird, zeigt

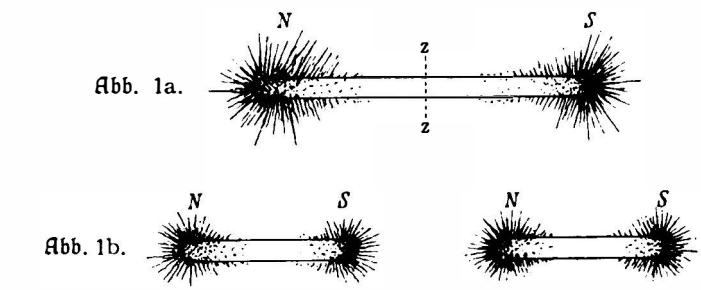


Abb. 1a u. 1b. Magnetstab mit seinen 2 Polen und seine beiden Hälften nach Zerbrechen.

sich nicht gleichmäßig an allen Stellen der Magnete, sondern sie sitzt immer hauptsächlich an zwei Stellen, „Pole" genannt. Jeder Magnet hat zwei Pole. Abb. 1a zeigt einen Stahlstab, der durch Streichen mit einem guten Magnetstein „magnetisiert" sein kann, was am besten durch „doppelten Strich" geschieht, indem man mit dem einen Pole des Steins oft wiederholt nach dem einen Ende des Stabes hin streicht und dann mit dem anderen Pol nach dem anderen Ende hin. Der abgebildete Stab ist dann in Eisenfeile getaucht und wieder

herausgenommen worden. Man ſieht ſeine zwei wohlausgebildeten Pole an den Enden; in der Mitte hält er gar keine Eiſenfeile feſt.

Dieſe Erſcheinungen ſind ähnlich denen der Elektrizität (1): Es ſind Anziehungen leichter Körper, wenn auch hier vorzugsweiſe nur des Eiſens, die zuerſt auffielen. Man konnte daher auch hier ein beſonderes Etwas annehmen, das dieſe Anziehungen ausübt, und man nannte es „den Magnetismus". Dieſer Magnetismus müßte alſo an den Polen der Magnete ſeinen Sitz haben.

Die Unterſuchung des Verhaltens von Polen gegeneinander zeigte wieder etwas ſehr Merkwürdiges: Macht man einen Magnetſtab beweglich, etwa indem man ihn in der Mitte an einem Faden aufhängt, und nähert man ihm den Pol eines anderen Stabes, ſo findet man, daß nur einer der Pole des beweglichen Magneten angezogen wird; der andere wird abgeſtoßen! Die beiden Pole eines und desſelben Magneten verhalten ſich alſo dem Probepol gegenüber entgegengeſetzt, und dies iſt bei jedem Magneten der Fall. Es gäbe alſo überhaupt zweierlei, einander entgegengeſetzte Magnetismen, wie es zweierlei Elektrizitäten gibt (7), und es ſäßen gleiche Mengen dieſer beiden entgegengeſetzten Magnetismen an den beiden Polen jedes Magneten. Aber unabhängig von ſolchen probeweiſe gemachten Vorſtellungen von Magnetismen ſind die Tatſachen feſtzuhalten: Das Beſtehen der Pole, der Anziehungszentren, und die Merkwürdigkeit des entgegengeſetzten Verhaltens der zwei Pole jedes Magneten.

Man bezeichnet die zweierlei Pole gewöhnlich mit „Nord" und „Süd", N und S, oder auch mit + und —, in Farben mit rot und blau. Die Namen Nord und Süd kommen daher, daß ein wie ſoeben angegeben aufgehängter Magnetſtab, von Störungen geſchützt, ſich ſelbſt überlaſſen, in die Nord-Süd-Richtung ſich ſtellt; danach war es gegeben, ſeine Pole nach den Richtungen zu benennen, die ſie weiſen. Wir gehen auf dieſe beſondere, merkwürdige Beziehung zum Erdmeridian ſpäter ein (259 u. f.), um zunächſt die Vergleichung des Magnetismus mit der Elektrizität eingehend weiter durchzuführen.

Es iſt leicht, mit Hilfe eines willkürlich gewählten Probepols irgendeines Stabes Pole anderer, beweglich gemachter Magnete zu prüfen; alle Pole, die vom Probepol angezogen werden, ſind untereinander gleich beſchaffen; iſt einer davon Nordpol, ſo können ſie alle mit N bezeichnet werden, die vom Probepol abgeſtoßenen alle mit S.

Unterſucht man danach das Verhalten ſo ausgeſuchter gleicher, ſowie ungleicher Pole gegeneinander, ſo findet man: Anziehung zwiſchen N und S, dagegen Abſtoßung zwiſchen N und N und ebenſo zwiſchen S und S. Es iſt alſo wie bei den Elektrizitäten (5, 7): Ungleiches zeigt Anziehung, Gleiches Abſtoßung.

231. Coulombs Geſetz für Magnetismen. — Nach dieſen Erkenntniſſen lag es nahe, das quantitative Geſetz dieſer anziehenden und abſtoßenden Kräfte der Magnetpole zu ermitteln, und dies hat Coulomb, wie bei den Kräften der Elektrizitäten (14), mit ſeiner Drehwaage ausgeführt (1785). Eine beſondere Schwierigkeit war dabei die Mitwirkung ungewollter Pole, da es Magnete mit einzelnen Polen nicht gibt (was allerdings in der Natur der Sache liegt, 232). Wenn z. B. in Abb. 2 die abſtoßende Kraft der zwei Pole N und N_1 in gemeſſenem Abſtande voneinander durch gemeſſene Verdrillung des Aufhängedrahtes er-

mittelt werden sollte, so war immer noch die Mitwirkung der Kräfte zwischen den Polen N und S_1, S und N_1 und S und S_1 zu berücksichtigen. Möglichst lange Magnetstäbe erleichterten diese Berücksichtigung. Übrigens hat Coulomb außer diesen statischen Messungen der Kräfte auch dynamische Messungen mittels schwingender Stäbe durchgeführt (vgl. 268). Es ergab sich aus allen Messungen dasselbe Gesetz wie für die Elektrizitäten; wieder ist das reziproke Quadrat des Abstandes r der beiden aufeinander wirkenden Pole maßgebend:

$$\text{Kraft} = \frac{m_1 m_2}{r^2}, \qquad 231)$$

wobei m_1 und m_2 Maße der Stärken der beiden Pole (der Mengen der an ihnen sitzend gedachten Magnetismen) sind (vgl. 232, 245).

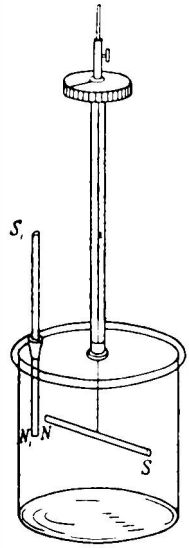


Abb. 2. Coulombs Drehwaage, magnetisch.

Wie beim elektrischen Gesetz (14) sind auch hier Kraft und Gegenkraft einander gleich und entgegengesetzt gerichtet (M 209).

Mit Hilfe von Coulombs Gesetz ist es möglich, alle Kräfte zwischen Stahlmagneten, die unveränderliche Polstärken haben, richtig zu berechnen, wenn auch die Schwierigkeit besteht, daß die Pole niemals Punkte sind, worauf Rücksicht zu nehmen ist. Wir werden später in einem wichtigen Fall sehen, wie Gauß die Schwierigkeit mit Erfolg umgangen hat (265, 266).

232. Magnetismen gibt es nicht. — Es bleibt aber die Frage, wie die Kräfte zwischen Magneten und weichem Eisen (229) zu verstehen seien. Die Analogie von Magnetismus und Elektrizität legte eine ähnliche Erklärung nahe, wie für die Anziehung zwischen elektrisch geladenen Körpern und unelektrischen Leitern (16, 18), nämlich durch „magnetische Influenz". Das weiche Eisen verhielte sich dabei wie ein Leiter für Magnetismus, der beide Magnetismen in gleicher Menge enthält. Trägt ein Stahlmagnet A, Abb. 3, an seinem Pole N ein Stück weichen Eisens B, so wäre dies danach so zu denken, daß der Pol N die Magnetismen im Eisenstück mit Kräften nach Coulombs Gesetz trennt, so daß das Eisenstück Pole, S N erhält, mit deren einem es dann, wieder nach Coulombs Gesetz, am Magneten A hängt. Seinerseits kann dann B das Eisenstück C und möglicherweise eine ganze Kette weiterer Eisenstücke influenzieren und zum Haften bringen, was leicht zu beobachten ist und auch bei der Häufung großer Mengen von Eisenfeile an Magnetpolen sich zeigt (Abb. 1).

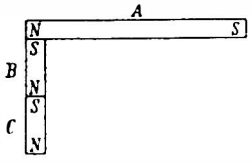


Abb. 3. Magnetstab, Kette weicher Eisenstücke am Pole tragend.

Diese Influenzerklärung ist aber doch falsch; sie kann nicht der Wirklichkeit entsprechen. Wohl ist es richtig, daß Pole an den Eisenstücken sich ausbilden; diese Pole können bei etwas Remanenz (229) nicht ganz weichen Eisens auch nach dem Auseinandernehmen der Kette gut als vorhandene Anziehungszentren nachgewiesen werden. Aber es trifft nicht zu, daß an diesen Polen, ja überhaupt an Magnetpolen, etwas Besonderes säße, „Magnetismus" oder

„magnetisches Fluidum" genannt, mit dessen Menge in Coulombs Gesetz gerechnet wird und das weiter verfolgbar und in seinen Eigenschaften untersuchbar wäre, wie es die — ursprünglich auch nur vermutungsweise gedachten — beiden Elektrizitäten tatsächlich sind. Schon eine von Gilbert gemachte, wichtige Erfahrung konnte zeigen, daß es mit den Magnetpolen trotz ihrer Ähnlichkeit mit elektrischen Körpern doch eine andere, besondere Bewandtnis haben muß.

Man kann nämlich diese gedachten Magnetismen *nie voneinander trennen*, während dies bei den Elektrizitäten in wohlbekannter Weise auf mehrfachen Wegen, nicht nur durch Influenz, möglich ist. Hat man einen Stahlstab mit gut ausgebildeten Polen, wie in Abb. 1a, und *zerbricht man ihn in der Mitte*, bei z z, so treten keine getrennten Magnetismen auf; nicht Stahlstücke mit nur je einem Pol erhält man, sondern etwas ganz Neues tritt auf: Es zeigen sich an der Bruchstelle zwei neue, vollkommen wohlentwickelte Pole einander entgegengesetzten Zeichens, und jedes Bruchstück ist wieder ein fertiger Magnet mit Nord- und Südpol. Prüfung mit Eisenfeile (siehe Abb. 1b) und mit einem beweglichen Magneten zeigt leicht diese höchst bemerkenswerte Tatsache. Die Vorstellung von den Magnetismen, den magnetischen Fluiden, als den Polstoffen, war damit schon früh erledigt. *Es sitzt offenbar nichts Besonderes an den Polen*, was nicht überall im Magneten vorhanden wäre; es gibt keine Magnetismen.

Wir benutzen dementsprechend den Namen „Magnetismus" nicht weiter in dem alten stoffartig gedachten Sinne, sondern nur, wie in den Überschriften dieses Bandes und Abschnittes, zu einer zusammenfassenden Bezeichnung der magnetischen Erscheinungen überhaupt. Die Größen m_1 und m_2 in Coulombs Gesetz — die *Polstärken* — haben danach zunächst nur die Bedeutung *quantitativer Angaben über die Wirksamkeit der betreffenden Pole* (245).

233. *Elementarmagnete.* — Zerbricht man einen Magneten weiter in immer kleinere Teile, so zeigt sich jeder Teil wieder als Magnet mit zwei Polen. Geht das bis zu den Molekülen, so ist jedes Molekül eines Magneten ein kleiner Magnet. Es zeigt sich so jeder Magnet aus jedenfalls sehr vielen, sehr kleinen „Elementarmagneten" zusammengesetzt und zwar wohlgeordnet, wie Abb. 4

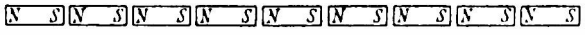


Abb. 4. Magnetische Elementarteile eines Magnetstabes.

es schematisch darstellt. Nach Coulombs Gesetz kann dann überlegt werden, daß das dichte Zusammenstehen einander entgegengesetzter Pole in der ganzen Länge des Stabes deren Wirkung nach außen verhindert, so daß nur die Wirkung der Endpole übrig bleibt. Das Zerbrechen macht dann immer wieder neue Endpole frei.

234. Was den *Vorgang beim Magnetisieren* eines Stabes betrifft (229), so ist nicht anzunehmen, daß dabei die Elementarmagnete neu geschaffen werden; das weiche Eisen mit seinem schnellen Annehmen und Wiederverlieren von Polen spricht dagegen. Sondern es ist anzunehmen, daß im unmagnetischen Eisen *die Elementarmagnete schon vorhanden* sind, nur ungeordnet. Das Magnetisieren besteht dann im Ordnen der Elementarmagnete, wobei

diese so gedreht werden, daß schließlich alle gleichartigen Pole nach gleicher Richtung sehen, wie in Abb. 4. Dies geschieht beim Magnetisieren durch Streichen, aber auch schon beim Anhängen eines Eisenstückes an einen Magneten, wie in Abb. 3.

Sind alle Elementarmagnete eines Eisen- oder Stahlstückes in Ordnung gewendet, so können seine Pole nicht weiter verstärkt werden. Eine solche Grenze der Magnetisierbarkeit wird tatsächlich immer merklich; man sagt dann, es trete „Sättigung mit Magnetismus" ein.

Man sieht, daß nun Coulombs Gesetz nur mehr für die vorgegebenen Pole der Elementarmagnete in Anspruch genommen wird, nicht für „Magnetismen", die im Eisen oder anderen Stoffen hin und her beweglich wären und die es, wie wir fanden (232), nicht gibt.

Stahl und weiches Eisen unterscheiden sich von einander dadurch, daß die Elementarmagnete in ersterem schwerer drehbar sind als in letzterem, dafür aber auch ihre einmal eingetretene Ordnung bewahren. Dies ist die „Koerzitivkraft" und die „Remanenz" des Stahles (229) [1]).

Diese Vorstellungen haben sich durchaus bewährt. Über die genaue Anordnung der Elementarmagnete in einem Magneten, besonders an den Polen, die niemals Punkte sind, werden die alsbald zu betrachtenden Magnetkraftlinien Auskunft geben.

235. Es bleibt die Frage nach der Natur der Elementarmagnete des Eisens. Jedenfalls bestehen sie aus Eisenatomen oder Gruppierungen derselben, die schon von Natur aus Magnete sein müssen. Die Gesamtfrage des Ursprungs des Magnetismus liegt dann in der besonderen Beschaffenheit der Eisenatome, was auch durch die magnetischen Eigenschaften der Salze des Eisens gesichert ist (310 u. f.). Wir kommen auf die Elementarmagnete später zurück (257, 258, 304, 312, 313).

Es zeigt sich übrigens, daß das Eisen nicht allein steht mit seinen magnetischen Eigenschaften; es besitzt dieselben nur in außerordentlich hervorragendem Maße. Nickel und Kobalt, diese auch in anderen Beziehungen dem Eisen ähnlichen Metalle, sind dem Magnetismus ebenfalls zugänglich, und wenn man fein genug zusieht, sind es alle Stoffe, worauf wir später eingehen (310 u. f.). Der Magnetismus ist demnach zuletzt eine Frage der Beschaffenheit der Atome überhaupt. In dieser Hinsicht ist einige gut gegründete Kenntnis vorhanden, auf die wir ebenfalls später eingehen (304). Dabei löst sich auch die besondere Frage, wie die Drehbarkeit der Elementarmagnete innerhalb fester Körper zu denken sei.

Magnetkraftlinien.

236. Coulombs Gesetz nicht ausreichend. — Coulombs Gesetz ist zwar auf Stahlmagnete mit fest an ihnen liegenden Polen gut anwendbar; zum weiteren Eindringen ins Verstehen der magnetischen Erscheinungen ist es aber nicht geeignet; denn es rechnet mit den Magnetismen, die es gar nicht gibt (232),

[1]) Koerzitivkraft zeigt sich auch darin, daß der Magnetismus eines Eisenstückes bei Annäherung eines Magneten nur in kleinen Grenzen stetig wächst (und leicht auch wieder rückgängig wird); größere Zuwächse erfolgen ruckweise, was durch Induktionsbeobachtung (338) nachweisbar ist.

und seine Anwendung auf die Pole der Elementarmagnete (234) ist behindert durch die geringe Kenntnis von diesen Elementarmagneten. Es war daher nötig, neue, der Naturbeobachtung entnommene Vorstellungen einzuführen, und dies geschah durch Faraday mit den Magnetkraftlinien (1837, vgl. 61 u.f.).

Diese Linien bezogen sich ursprünglich nicht auf die greifbaren Magnete oder deren Teile, sondern ganz auf den Raum um die Magnete, in welchem den Sinnen Verborgenes zu denken war, das den für sich allein schlecht verständlichen, in diesem Raum beobachtbaren Wirkungen zugrunde liegt. Wir werden diese Vorstellungen hier in einfachster Weise, aber sogleich mit Einbeziehung des Inneren der Magnete entwickeln. Dabei können wir die schon behandelten elektrischen Kraftlinien zum Ausgangspunkt nehmen (64 u. f.).

Es mag anfangs scheinen, als gingen die Kraftlinien nicht über Coulombs Gesetz hinaus, und dies ist vielleicht auch der Grund, warum es lange dauerte, bis man Faraday folgte. Aber der nachher zu behandelnde Zusammenhang von Elektrizität und Magnetismus zeigt (276 u. f., 328), wieviel mehr die Kraftlinien umfassen als jenes Gesetz, dessen Anwendungsbereich bald als eng begrenzt erkennbar wird (239 u. f.), entsprechend der Nichtwirklichkeit der an den Polen sitzenden „Magnetismen" (232):

Es ist hier ähnlich wie mit den elektrischen Kraftlinien, die auch von weit umfassenderer Bedeutung sich zeigten als Coulombs elektrisches Gesetz (58 u. f.).

237. Gemeinsame Eigenschaften der magnetischen und der elektrischen Kraftlinien. — Die Gemeinsamkeit ist sehr weitgehend. Wir werden auch ihre Grenzen angeben, wonach die charakteristischen Verschiedenheiten der magnetischen von den elektrischen Kraftlinien leicht ersichtlich werden (255).

Hier, wo zunächst das Gemeinsame zu behandeln ist (237—254), genügt meist eine kurze Darstellung mit Hinweis auf die früheren, eingehenden Betrachtungen zu den analogen Fällen der elektrischen Kraftlinien.

Magnetische Kraftlinie oder kurz Magnetkraftlinie ist eine Linie, die überall die Richtung der magnetischen Kraft hat (vgl. 66).

Magnetische Kraft irgendwo im Raume wird ermittelt durch die mechanische Kraft, welche ein an die betreffende Raumstelle gebrachter Prüfpol oder Einheitspol (265) erfährt. Größe und Richtung dieser mechanischen Kraft geben Größe und Richtung der magnetischen Kraft an (vgl. 64).

238. Kraftlinienzeiger. — Der willkürlich zu wählende, aber unveränderlich zu bewahrende Prüfpol kann am Ende eines dünnen langen Stahlmagneten sein. Besser, weil dem steten Vorhandensein zweier Pole unmittelbar entsprechend, ist es, einen sehr kurzen, nach allen Richtungen frei drehbaren Magneten, eine kleine Magnetnadel an die betreffend Raumstelle zu bringen. Geht die Achse der Nadel durch ihren Schwerpunkt, so ist die Schwerkraft ausgeschaltet und die Nadel stellt sich dann stets von selber in die Richtung der magnetischen Kraft ein; sie wirkt somit als Kraftlinienzeiger. Abb. 5 stellt einen solchen dar; die Drehfreiheit ist durch die horizontale Achse in der Gabel

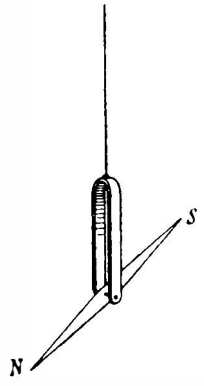


Abb. 5. Kraftlinienzeiger (Inklinationsnadel).

und durch den vertikalen Aufhängefaden erreicht; die Gabel muß aus genügend unmagnetischem Stoffe, z. B. Messing, bestehen.

Die Größe der magnetischen Kraft wird im Falle der Nadel durch das Drehmoment gegeben, welches sie in Stellung quer zur Richtung der Kraft erfährt (s. 266). Die Nadel muß unveränderliche Pole haben.

Magnetisches Feld oder kurz Magnetfeld ist ein Raum, in welchem magnetische Kraft und also auch Kraftlinien vorhanden sind. Stärke des Feldes an irgendeinem Punkt ist die Größe der Kraft dortselbst (vgl. 65).

239. Ermittelung des Kraftlinienlaufs. — Magnetkraftlinien können durch Absuchen des Raumes mit der Magnetnadel als Kraftlinienzeiger sehr einfach und sicher ermittelt werden.

Außerdem ist Eisenfeile ein gutes Mittel, um Magnetkraftlinien unmittelbar auf Papier gezeichnet zu erhalten. Man stellt die Papierfläche so, daß

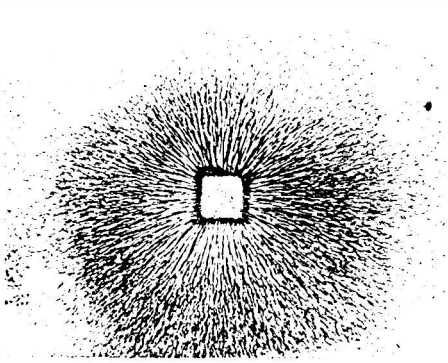


Abb. 6. Magnetpol.

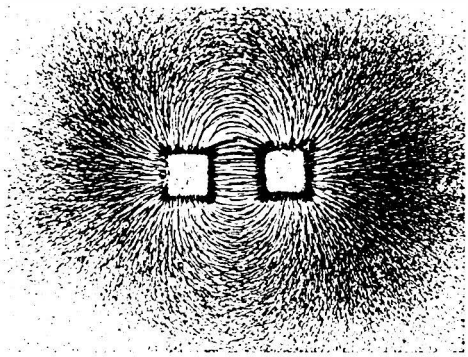


Abb. 7. Zwei entgegengesetzte Pole.

vorher mit der Nadel ermittelte Kraftlinien in sie fallen, bestreut sie mit Eisenfeile und klopft ein wenig, um die große Ruhereibung der Eisenfeile am Papier fortfallen zu lassen. Die Feile ordnet sich dann in Kraftlinien, indem ihre einzelnen Teile unter dem Einfluß des Feldes Pole annehmen, wie die Eisenstücke B C in Abb. 3, und also als Kraftlinienzeiger wirken, die sich aneinander reihen (vgl. 82). In dieser Weise sind die Kraftlinienbilder Abb. 6—13 und viele weiter folgende hergestellt.

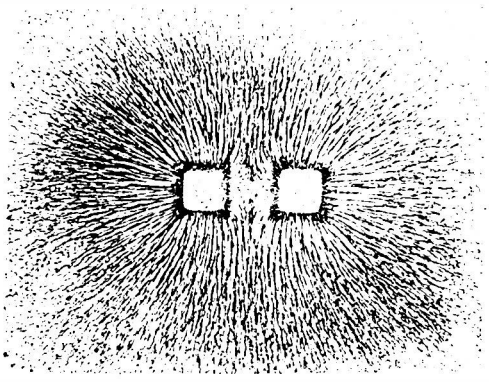


Abb. 8. Zwei gleichnamige Pole.

240. Magnetfeld in der Nähe von Polen. — Abb. 6 ist in der Horizontalebene unmittelbar über dem Polende eines langen, senkrecht gestellten Magnetstabes quadratischen Querschnitts aufgenommen, Abb. 7 ebenso über zwei solchen Stäben, die mit entgegengesetzten Polen unter dem Papier stehen, Abb. 8 ebenso mit zwei gleichnamigen Polen.

Man sieht die vollkommene Ähnlichkeit mit den elektrischen Kraftlinienbildern, Bd. III Abb. 78, 79, 80. Diese Ähnlichkeit entspricht dem für die magnetischen wie für die elektrischen Kräfte gleichmäßig geltenden Entfernungsquadratgesetz Coulombs und der Tatsache, daß die benutzten Magnetpole genügend engbegrenzt (punktförmig) waren, wie die Kugeln in den elektrischen Fällen, bzw. daß eine räumliche Verwaschenheit der Magnetpole in den betrachteten Ebenen nicht wesentlich merklich werden konnte.

241. Definition des Poles. — Da Pole die Orte sein sollen, von welchen die Kräfte der Magneten ausgehen (230), so muß der bewegliche Kraftlinienzeiger, die Magnetnadel, in der Nähe von Polen gegen diese zeigen, d. h. im Kraftlinienbild: Pol ist ein Ort, nach welchem hin Kraftlinien zusammenlaufen oder von welchem aus solche auseinander laufen. In anderer Weise ist der Pol auch gar nicht zu definieren, wenn man Bezugnahme auf Unwirkliches vermeiden will; „Sitz des Magnetismus" ist der Pol nicht, weil es Magnetismus gar nicht gibt (232).

242. Untersucht man die Kraftlinien eines Stabmagneten in der Ebene seiner Längsachse, indem man das Papier dicht über seine ganze Länge

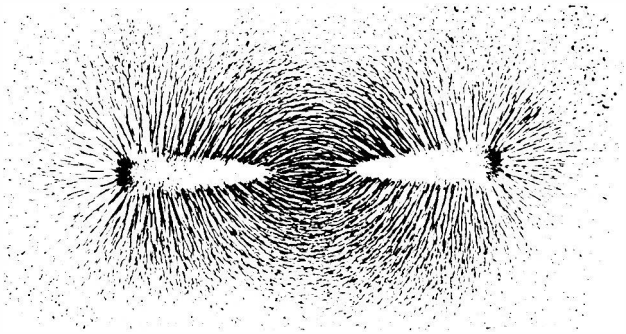


Abb. 9. Magnetstab (zylindrisch).

legt, so erhält man Abb. 9. Man sieht hier die Verwaschenheit der Pole; denn die Kraftlinien konvergieren zwar nach den beiden Enden des Stabes, aber keineswegs nach je einem Punkt hin, der als bestimmter Pol zu bezeichnen wäre. Übrigens sieht man hier den gleichen Lauf der Kraftlinien von Polende zu Polende wie in Abb. 7, entsprechend der Tatsache, daß die beiden Pole eines und desselben Magneten von entgegengesetzter Art sind. Man bemerkt auch aus Abb. 9, daß die Kraftlinien der Abb. 6—8 nur in der Nähe der Stabenden in der Papierebene laufen können, weil sie weiter zum anderen, weit hinter der abgebildeten Ebene liegenden Stabende umbiegen müssen. Die Eisenfeile bildet unter solchen Umständen nur die in der Papierebene gelegene Komponente der Kraft ab, was aber hier nicht weiter stört.

243. Noch mehr als in Abb. 9 ist die Polverteilung auf weite Strecken am Kraftlinienbild eines Hufeisenmagneten, Abb. 10, zu sehen. Man kann hier gar keine Begrenzung für den Teil des Magneten angeben, den man Pol nennen

wollte; jedenfalls wäre der größere Teil der Schenkel des Hufeisens mit einzubeziehen, da die Kraftlinien fast überall von ihnen rings auseinanderlaufen.

Man könnte in solchem Falle, z. B. zwischen den Schenkeln des Hufeisenmagneten, gar nicht nach Coulombs Gesetz rechnen, außer man wollte es auf die zahllosen Pole der Elementarmagnete des Hufeisens anwenden, deren genaue Anordnung aber auch erst bekannt sein müßte. Die Magnetkraftlinien geben dagegen, wie wir auch noch weiter sehen werden, alles was über den Magnetismus des Hufeisens oder der Stäbe überhaupt nur gefragt werden kann; sie haben für die magnetischen Erscheinungen ganz dieselbe umfassende Bedeutung wie die elektrischen Kraftlinien für die elektrischen Erscheinungen (58 u. f.).

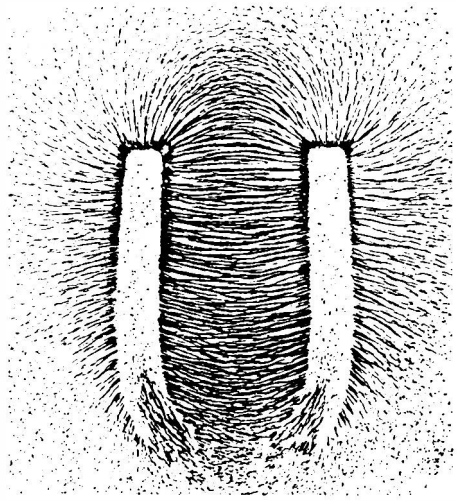


Abb. 10. Hufeisenmagnet.

244. Feldstärke ist Kraftliniendichte. — Man sieht durch die Eisenfeile nur die Formen der Kraftlinien; eine bestimmte Anzahl derselben ist damit nicht gegeben. Man kann aber die Anzahl der in den gegebenen Formen zu zeichnenden Kraftlinien so wählen, daß die Stärke des Feldes überall im materiefreien Raum[1]) richtig dargestellt wird. Es geschieht dies, indem man die Zahl der Kraftlinien, die durch eine zu ihnen senkrecht stehende Flächeneinheit gehen, kurz die Kraftliniendichte, proportional der Feldstärke nimmt (vgl. 67). Wir werden dies in allen Kraftlinienzeichnungen, wie Abb. 14, 22 und weiter folgenden, stets durchführen.

245. Maß der Polstärke. — Es geht dann von jedem Pol eine bestimmte Zahl von Kraftlinien aus, und diese Kraftlinienzahl, die vom Pol ausgeht oder zu ihm zusammenläuft, ist das einwandfreie Maß für die Stärke des Poles. In den später zu wählenden Einheiten hat der Einheitspol 4π Kraftlinien (265).

246. Wenn man überall im ganzen Raum um irgendwelche Magnete die Kraftlinienzahl in der angegebenen Weise (244) zu richtiger Darstellung der Feldstärke einrichtet, so zeigt sich, daß nirgends im Raum eine Kraftlinie zu Ende oder zu neuem Beginnen kommt. Die richtige Darstellung ergibt sich demnach von selbst, wenn die an einer Stelle in richtige Abstände gebrachten Kraftlinien nur in den ihnen eigenen Formen weiter verlängert werden[2]).

[1]) Laufen die Kraftlinien durch Materie, so ist die Größe der Kraft, die Feldstärke, bei gleicher Kraftlinienzahl im allgemeinen verändert; wir betrachten dies später besonders (253). Sehr großen Einfluß hat nur Raumerfüllung mit Eisen; den Luftraum können wir für jetzt gleich dem Vakuum betrachten.

[2]) Dieses Nichtenden der magnetischen Kraftlinien gilt in unserer, auf das Wesentlichste eingestellten Kraftlinienvorstellung ganz allgemein, auch beim Übergang der Kraftlinien in

Diese Eigenschaft, nicht frei zu enden, noch zu beginnen, fanden wir auch bei den elektrischen Kraftlinien, und wir haben sie im Falle einer elektrisch geladenen Leiterkugel als gleichwertig mit der Gültigkeit von Coulombs Gesetz gezeigt (68). Es läßt sich auch zeigen, daß die Eigenschaft des Nichtendens der Kraftlinien bestehen bleibt, wenn die vorhandenen Kräfte Resultierende beliebig vieler Einzelkräfte sind, die von beliebig vielen Punkten ausgehend alle nach Coulombs Gesetz wirken, und man kann daher das tatsächliche Nichtenden der Kraftlinien als Beweis dafür ansehen, daß Coulombs Gesetz für die Pole der Elementarmagnete gültig ist.

Man bemerkt, daß das Nichtenden der Magnetkraftlinien eine sehr einfache Ermittelung der Feldstärke überall in einem Raum ermöglicht, der selbst keine Pole enthält, wenn man nur die Feldstärke längs einer Fläche kennt, die alle vorkommenden Pole umschließt und die Form der Kraftlinien ermittelt hat. Eine solche Fläche wäre, wenn nur ein Magnet da ist, die Oberfläche dieses Magneten. Kennt man auf dieser überall die Feldstärke, so zeichnet man dort die Kraftlinien in der entsprechenden Dichte und verlängert sie dann, etwa der Eisenfeile folgend, einfach weiter, um das ganze Feld der Umgebung des Magneten richtig zu erhalten.

Es kommen dabei alle Kraftlinien, die von einem Pole des Magneten ausgingen, beim anderen zusammen, und dies ist der Ausdruck dafür, daß die beiden Pole eines Magnetstabes gleiche Stärke haben (245). Es kann allerdings Stahlstäbe geben, die mehr als zwei Pole haben, man nennt sie wohl schlecht magnetisiert; aber die angegebenen Kraftlinieneigenschaften sind auch für solche Fälle in Geltung.

247. Eine andere, den magnetischen und den elektrischen Kraftlinien gemeinsame Eigenschaft ist diese, daß niemals zwei Kraftlinien einander schneiden. Die Begründung ist dieselbe, wie bei den elektrischen Kraftlinien (71).

248. Die an den Beispielen bereits gesehene, der Gültigkeit von Coulombs Gesetzen entsprechende Übereinstimmung der Formen elektrischer und magnetischer Kraftlinien zeigt auch für die letzteren den Satz als gültig, daß sie geformt sind wie gespannte Fäden, die einander drängen (83). Auch für die bei Bewegung eintretenden Umgruppierungen der Kraftlinien gilt das gleiche im magnetischen, wie im elektrischen Felde (85). Ebenso formen sich nicht nur sondern wirken auch die magnetischen, gleich den elektrischen Kraftlinien, wie gespannte, einander drängende Fäden (87), und auch die Sätze über die Ungleichheit des Zuges sowie des Drängens jeder einzelnen Kraftlinie und die stets vorhandene Proportionalität von Zug und Drängen gelten für die magnetischen wie für die elektrischen Kraftlinien (88).

Alle diese Kraftlinieneigenschaften bleiben auch für die später zu behandelnden Fälle von magnetischen Kräften, die gar nicht mehr nach Coulombs Gesetz sich verhalten, gültig (276 u. f.), was wieder die umfassende Bedeutung der Kraftlinien zeigt.

249. Kraftlinien und Kräfte zwischen Magneten mit unveränderlichen Polen. — Als ein Beispiel für die Formen und die Wirksamkeit der Kraftlinien von Stahlmagneten sei noch Abb. 11 betrachtet. Es liegt hier neben dem schon für Abb. 9 benutzten Magnetstab N S

---

beliebige Materie (vgl. über sonst eingeführte Vorstellungen 254 und Anhang E Va, 1, auch die entsprechenden Bemerkungen über die elektrischen Kraftlinien in den Noten zu 72 und 107).

ein kleinerer n s quer in einigem Abstand. Man sieht auf der dem kleinen Stab abgewandten Seite das Magnetfeld des großen Stabes ziemlich unverändert, wie in Abb. 9; auf der anderen Seite hat Umformung stattgefunden. Das Feld des kleinen Stabes hat sich mit dem des großen so vereinigt, daß wieder alle vom Nordpol N ausgehenden Kraftlinien zu einem Südpol laufen; nur daß es jetzt zumeist der Südpol s des kleinen Magneten ist; nur wenige der Kraftlinien laufen in großem Umkreis, außerhalb der Abbildung, um den kleinen Magneten herum zum Südpol S. Alle eigenen Kraftlinien des kleinen Magneten laufen innerhalb dieses Umkreises; doch ist sein Feld durch das Drängen der anderen Kraftlinien verzerrt, indem auch viele Kraftlinien von S jetzt nach n laufen. An den beiden mit o bezeichneten Stellen kommt keine Kraftlinie vorbei; es sind das Nullstellen der Kraft, wie die Mitte zwischen den gleichen Polen in Abb. 8.

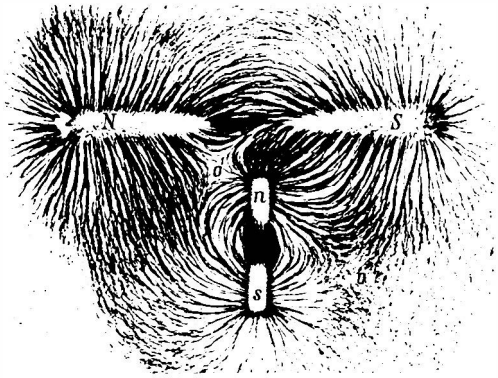


Abb. 11. Zwei Magnetstäbe.

Man sieht aus den Kraftlinien auch, daß und wie die beiden Magneten einander zu bewegen streben. Ist der große Magnet festgehalten, so wird der Pol n des kleinen durch die Gesamtheit der Kraftlinien an ihm nach rechts und zum großen Magneten hin, der Pol s nach links gezogen, und man sieht, wie zuletzt der kleine Stab an den großen mit entgegengesetzten Polen herantäme, wobei große Verkürzungen der Kraftlinien stattfänden.

Es ist in allen Fällen so, daß Zug und Drängen der Kraftlinien alle Kräfte von Polen zu Polen richtig wiedergeben. Die richtige Wiedergabe der Kräfte überall im Raum und auf beliebige Körper durch die Kraftlinien gilt aber, wie schon bemerkt, ganz allgemein, auch für die Fälle, wo es gar keine Pole gibt (323).

250. Verhalten weichen Eisens im Magnetfelde. — Weiches Eisen verhält sich den Magnetkraftlinien gegenüber ganz so wie die dielektrischen Körper den elektrischen Kraftlinien gegenüber (107—112). Die Magnetkraftlinien dringen ins Eisen ein und gehen durch; das Magnetfeld setzt sich im Eisen fort. In einer quer zu den Kraftlinien eines homogenen — d. i. überall gleichgerichteten und gleich starken — Magnetfeldes (vgl. 84) gestellten, großen Eisenplatte findet einfache, geradlinige Fortsetzung der Kraftlinien statt, wie bei der dielektrischen Platte im Plattenkondensator (104, 111). In einem begrenzten Stück Eisen treten dieselben Veränderungen der Kraftlinien ein, wie bei einem guten Dielektrikum im elektrischen Feld (111): die Linien verdichten sich gegen den Körper zu und im Inneren desselben, wie es das Beispiel der Schellack- oder Schwefelkugel in Bd. III Abb. 87 zeigte. Die Magnetkraftlinien gehen von außen her auf das Eisen zu, fast wie elektrische Kraftlinien zu einem Leiter (Bd. III, Abb. 81); aber es findet kein Enden der Magnetkraftlinien am Eisen statt, sondern Fortsetzung in dessen Innerem.

In dieser Weise beeinflußt das Eisenstück A B (Abb. 12) — der „Anker" — das in Abb. 10 schon betrachtete Feld des Hufeisenmagneten N S. Die Kraftlinien vom Pol N gehen jetzt nicht mehr in großem Umkreis durch Luft zum Pol S, sondern auf kurzem Wege von N nach A ins Eisen; sie kommen bei B wieder aus demselben heraus und gehen dann, wieder auf kurzem Luftwege, nach S. Einige

Kraftlinien gehen seitlich von den Polen nach außen, wie um den Anker herum; sie biegen aber meist zurück zu ihm, um doch ins Eisen einzudringen und den größeren Teil des Weges in dessen Innerem zu nehmen. Im Eisen ist offenbar besserer Weg für die Magnetkraftlinien als in Luft; das Eisen ist durchdringlicher für die Kraftlinien als die Luft; es hat eine größere „Permeabilität". Dies ist aber dasselbe, was wir bei den elektrischen Kraftlinien an Dielektriken bemerkten (112): der Raum in ihnen ist günstiger für die Ausbildung der Kraftlinien. Ebenso trifft für das Eisen im Magnetfeld zu, daß es die Kraftlinien gegen sich hin verdichtet, daß es aber auch selbst dorthin gezogen sich findet, wo die Kraftlinien am dichtesten sind. Eisen im Magnetfeld erfährt immer eine Kraft, die es nach den stärkeren Teilen des Feldes hinzieht. Das Hingehen des Eisens nach den Polen ist der gewöhnliche Sonderfall hiervon. Der Anker A B wird von den Polen N S angezogen; man sieht das unmittelbar an den beiden Kraftlinienbündeln N A und B S, die sich zu verkürzen streben. Die Bewegung des Ankers ist bei Abbildung 12 durch ein zwischengelegtes Holzstück verhindert; das Holz hat, im Gegensatz zum Eisen, keine wesentlich größere Permeabilität als Luft, weshalb es das Kraftlinienbild nicht beeinflußt.

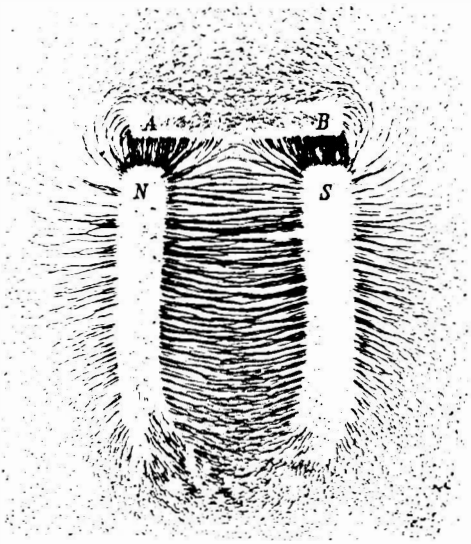


Abb. 12. Hufeisenmagnet mit Anker.

Man bemerkt in Abb. 12 (ebenso in 13) auch, daß schief ans Eisen kommende Kraftlinien nicht zu senkrechtem Eintritt umbiegen, sondern schief eintreten, was vollkommen analog dem Verhalten der elektrischen Kraftlinien am Dielektrikum ist (111).

251. Permeabilität. — Quantitativ kommt die betrachtete Eigenschaft des Eisens und auch aller anderen Körper den Magnetkraftlinien gegenüber in einer Zahlenangabe zum Ausdruck, die man sinngemäß (250) die Permeabilität nennt; wir bezeichnen sie mit μ. Permeabilität μ und Dielektrizitätskonstante ε (106) haben einander vollkommen analoge Bedeutungen; μ sagt für magnetische Kraftlinien was ε für die elektrischen sagt. Beide geben an, einen wievielmal besseren Weg für die Kraftlinien der betreffende Stoff bietet als das Vakuum.

Die zahlenmäßigen Unterschiede, die zwischen μ und ε bei verschiedenen Stoffen vorkommen, sind eigenartig und teilweise sehr groß. Tab. 49 zeigt Beispiele, worauf wir, ebenso wie auf die Meßweisen von Permeabilitäten später eingehender zurückkommen (310—312, 345). Man sieht die sehr große Permeabilität des Eisens, die kleineren Permeabilitäten von Nickel und Kobalt und im übrigen nur Zahlen, die sehr nahe 1 sind, wie für den materiefreien Raum. Dies ist der zahlenmäßige Ausdruck dafür, daß für den Magnetismus das Eisen

eine fast einzigartige, hervorragende Rolle spielt, wie es schon die ältesten Erfahrungen zeigten (229, 230). Die Dielektrizitätskonstanten verschiedener Stoffe (Tab. 41, Bd. III) haben dagegen eine ganz andere und vor allem nicht so extreme Größenverteilung.

Die Verdichtung der Magnetkraftlinien um und im Eisen ist dementsprechend sehr viel stärker als es für elektrische Kraftlinien an Dielektriken vorkommt.

Tab. 49. **Permeabilitäten.**

Magnetisch	Fe	2000	Diamagnetisch	Alkohol	0·9999916
	Co, Ni	200		H_2O	0·9999901
	Ce, Er, Sm			S, Sb	
	Pd, Mn, Cr	1·0004		Cu, Pb	0·99998
	Pt, Mo, W, Ur			Br, J	
	O_2			Au, Hg	0·99997
	Luft	1·0000004		Tl	0·999942
	CO_2, N_2, H_2			Bi	0·99981
	Vacuum	1			

252. Magnetischer Schutz. — In Abb. 13 ist ein eiserner Ring zwischen die Pole des Hufeisenmagneten gelegt[1]). Man sieht, daß die dort ohne den Ring (Abb. 10) ziemlich geradlinig von Pol zu Pol laufenden Kraftlinien alle auf kurzen Wegen in das Eisen des Ringes gehen. Sie setzen sich im Inneren des Eisens fort und laufen so beiderseitig um die Öffnung des Ringes herum, indem sie auf ihrem Wege von Pol zu Pol den längeren Eisenweg an Stelle des kürzeren Luftweges bevorzugen. Die Öffnung des Ringes bleibt daher frei oder fast frei von Kraftlinien, wie die liegengebliebene Eisenfeile anzeigt; der Ring bildet einen Schutz vor magnetischer Kraft für den von ihm umgebenen Raum. Dasselbe gilt noch besser für einen geschlossenen Mantel aus Eisen. Dieser magnetische Schutz gleicht dem elektrischen Schutz, welchen eine leitende Hülle gewährt (43); es verhält sich hier das Eisen gegenüber magnetischer Kraft wie ein Elektrizitätsleiter gegenüber elektrischer Kraft. Aber die Übereinstimmung der beiden Fälle ist unvollkommen: die elektrischen Kraftlinien enden am Leiter, die magnetischen setzen sich dagegen im Eisen fort. Daher kann die Leiterhülle für elektrischen Schutz fast beliebig dünn sein; die Eisenhülle für den magnetischen Schutz muß dagegen immer eine gewisse Dicke haben, sonst finden die Kraftlinien nicht genügend Platz im Eisen und es tritt eine merkliche Zahl in den Innenraum hinein.

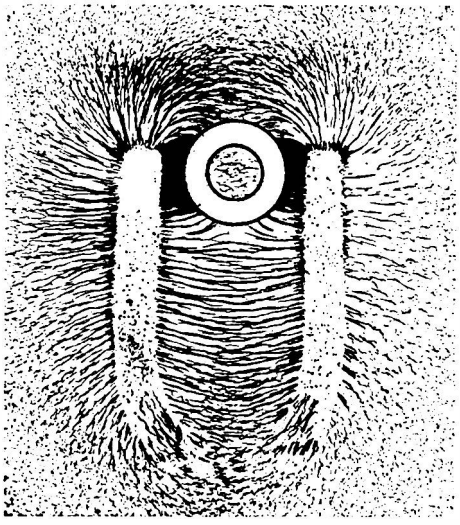


Abb. 13. Hufeisenmagnet mit Eisenring (Magnetischer Schutz).

253. Das Magnetfeld im Inneren von Eisen kann in einer Höhlung untersucht werden, in die man die prüfende Magnetnadel (238) bringt. Zur

[1]) Die Begrenzung des Ringes ist in der Abb. besonders angezeichnet.

Meſſung der Größe der Kraft müßte die Höhlung ein langgeſtreckter, enger Kanal ſein, deſſen Richtung ſchon in die Richtung der Kraft fällt. Das ſeitliche Drängen der Kraftlinien und damit auch deren Zug (248) wird dann im Kanal gleich dem in Eiſen, ſo daß man richtig die Kraftgröße im Eiſen erhält. Es gilt für die Kraftgröße im Eiſen ſowie auch in anderen Körpern dasſelbe wie für die elektriſchen Kräfte in Dielektriken (107, 110), nur daß an Stelle der Dielektrizitätskonſtante ε die Permeabilität μ tritt: Zug und ſeitliches Drängen der Kraftlinien ſind im Verhältnis $\mu : 1$ geringer als im freien Raum, und damit iſt auch die Feldſtärke nur $1/\mu$ der Kraftlinienzahl der Flächeneinheit.

Bei der großen Permeabilität des Eiſens ſind demnach die Felder in deſſen Inneren ſtets viel ſchwächer als an Stellen außerhalb, die in Richtung der Kraftlinien benachbart ſind; dem entſprechen auch die großen, an ſolchen Grenzflächen von Eiſen im Magnetfeld angreifenden, nach außen hin gerichteten Kräfte, wie an den Ankern von Magneten. Die Größenberechnung der Kräfte erfolgt wieder, wie im Falle der elektriſchen Felder, am beſten aus der Energie (112, 128).

Die Ermittelung von Kraftlinienzahlen und alſo Feldſtärken im Inneren von Eiſen erfolgt übrigens am beſten durch Induktion (344).

254. Überflüſſige Begriffe. — Man hat zur Darſtellung der verringerten Kraftgröße in Eiſen beſondere „Kraftlinien" eingeführt, die in entſprechend verringerter Dichte im Eiſen anzunehmen wären[1]). Es hat aber für Erkenntnis der großen Zuſammenhänge keinen Wert, die Begriffe mehr zu vervielfältigen als die Natur der Dinge es verlangt, und was unnötig iſt muß vermieden werden, um die Einfachheit der Wirklichkeit nicht zu verfälſchen. Auch eine Menge anderer Begriffe iſt noch eingeführt worden; ſie erlauben in gewiſſem Maße vorteilhaft mit dem Eiſen zu rechnen, ohne daß man aber dadurch die Wirklichkeit beſſer zu begreifen vermöchte als mittels der von uns betrachteten Kraftlinien und Elementarmagnete und deren Eigenſchaften. Wir vermeiden daher alle dieſe Zuſatzbegriffe[2]) (vgl. Note zu 72, 107 und 265 und Anhang E V, 1).

255. Unterſchied zwiſchen elektriſchen und magnetiſchen Kraftlinien. — Aller Unterſchied zwiſchen den beiden Kraftlinienarten geht allein darauf zurück, daß es wohl die beiden Elektrizitäten gibt, nicht aber die Magnetismen (232). Die beiden Elektrizitäten waren Anfang und Ende von elektriſchen Kraftlinien (72); Anfang und Ende von Magnetkraftlinien könnten die beiden Magnetismen ſein; da es dieſe aber nicht gibt, können Magnetkraftlinien auch keinen Anfang und kein Ende haben, ſie müſſen alſo ſtets in ſich zurücklaufende, geſchloſſene Linien ſein. Dies iſt der einzige und weſentliche Unterſchied gegen die elektriſchen Kraftlinien. Die letzteren endeten an den Leitern der Elektrizität; Magnetkraftlinien dringen überall hinein; es gibt auch keine Leiter für Magnetismus, da es dieſen ſelber nicht gibt.

Dem entſpricht es auch, daß die Kraftlinien eines Magneten, wie z. B. des

[1]) Unſere Kraftlinien werden dann mit dem Namen „Induktionslinien" belegt. Wir bleiben für die hier einzig zu betrachtenden Linien bei dem Namen Kraftlinien, und wir haben demnach nur zu unterſcheiden zwiſchen elektriſchen Kraftlinien und magnetiſchen Kraftlinien.

[2]) Technikern mögen ſie zur Berechnung elektriſcher Maſchinen (Dynamomaſchinen, Motoren) von einigem Nutzen ſein. Es iſt aber zu bemerken, daß die Elektrotechnik (Starkſtromtechnik) ihre erfolgreiche Entwickelung von der Zeit an nahm, da nur die von uns benutzten, einfachen Vorſtellungen zur Geltung gebracht wurden; das weitere Beiwerk iſt Schematiſierung von allerlei Nebendingen, die auch dem Techniker bei praktiſcher Erfahrung entbehrlich ſind, wenn er Klarheit in den Hauptbegriffen beſitzt.

Magnetstabes Abb. 9, am Stabe nicht enden, sondern daß man auch im Inneren des Stabes, in einer Höhlung (253), magnetische Kraft und also Kraftlinien findet, wie es auch unmittelbar der alten Erfahrung beim Zerbrechen eines Magneten (232) entspricht.

Als Pol bezeichneten wir demnach zutreffend einen Ort, von welchem aus Kraftlinien auseinandergehen oder zu welchen solche zusammengehen (241), nicht etwa an dem sie beginnen oder enden. Die Kraftlinien des Magnetstabes in Abb. 9 laufen außen so, als würden sie an den Polen enden; in Wirklichkeit haben sie ihre Fortsetzung zu geschlossenen Linien im Inneren des Magneten, wie es auch der gleichen Kraftlinienzahl der beiden Pole entspricht (246) und wofür auch der besondere Nachweis durch Induktion vorhanden ist (344, 345). Abb. 14 zeigt diesen Kraftlinienlauf schematisch. Man sieht, daß sämtliche Kraftlinien, die der Magnetstab überhaupt hat, in seinem Inneren zu einem fast parallelen Bündel vereinigt sind.

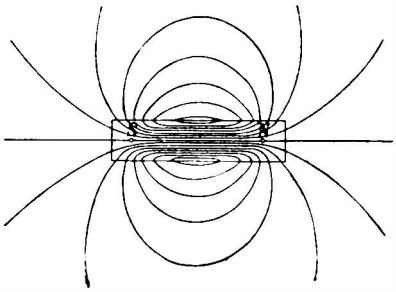


Abb. 14. Magnetkraftlinien stets geschlossen.

Diese Abb. 14 ist aus dem Kraftlinienbild zweier entgegengesetzt gleich elektrisch geladenen Kugeln (Abb. 79, Bd. III) entstanden, indem nur der rechteckige, den Magnetstab darstellende Teil S N ersetzt ist durch die Zeichnung der inneren Verbindungen der am Rechteck endenden Kraftlinien. Die Abbildung entspricht demnach für den Raum außerhalb des Magnetstabes ganz Coulombs Gesetz. Vergleicht man diesen Kraftlinienlauf, Abb. 14, außerhalb des Stabes mit den Kraftlinien eines tatsächlichen Magnetstabes, Abb. 9, so sieht man kaum einen Unterschied. Dies zeigt, daß Coulombs Gesetz, mit der Vorstellung von Polen als Kraftzentren, bei Anwendung auf das Äußere eines Magnetstabes gut zutrifft, was auch durch eine verfeinerte Untersuchung besonders nachgewiesen ist (269); nur im Inneren des Magnetstabes ist der Kräfteverlauf ein ganz anderer.

256. Der magnetische Fluß. — Die magnetischen Kraftlinien gleichen Strömungslinien und zwar, als in sich geschlossen, Strömungslinien in einer überall den Raum erfüllenden Flüssigkeit ohne Ein- und Ausströmung. Wir haben diese Übereinstimmung, sowie auch die der elektrischen Kraftlinien mit Wirbellinien, bereits hervorgehoben, allerdings mit der Bemerkung, daß die Deutung der Übereinstimmung etwa auf Bewegungen des Äthers keinen festen Anhalt gefunden hat (129). Als tatsächlich bestehend ist die Formgleichheit von Magnetkraftlinien und Strömungslinien aber stets vorteilhaft festzuhalten. Sie gehört zu den Eigenschaften der Magnetkraftlinien; sie hilft auch zur Kürze des Ausdrucks, was wir wiederholt benutzen werden.

Nennt man die Gesamtheit der Kraftlinien eines Magneten seinen „magnetischen Fluß", so kann beispielsweise gesagt werden, daß der ganze magnetische Fluß eines Stahlmagneten durch sein Inneres geht und an seinen Polen aus- und eintritt. Das Innere des Magneten wirkt wie eine Pumpe, die seinen magnetischen Fluß dauernd in Gang hält. Die Verteilung des magnetischen Flusses im Raume richtet sich nach der Permeabilität der den Raum erfüllenden Stoffe (250, 251, 302).

Maßmäßig genommen bedeutet der magnetische Fluß die Anzahl der zu einem Magneten gehörenden Kraftlinien, was gleichbedeutend mit seiner Polstärke ist (245).

257. Die Kraftlinien der Elementarmagnete. — Die Elementarmagnete haben nach der Erfahrung beim Zerbrechen von Magnetstäben (233) die Eigenschaften sehr kurzer und dünner Stabmagnete. Es gilt daher Abb. 14 für ihre Felder. Im unmagnetisierten Eisen oder Stahl sind diese Felder ungeordnet; das Magnetisieren besteht im Ordnen der Felder unter Drehung der Elementarmagnete (234). Diese Drehung der Elementarmagnete ist weitgehend analog den dielektrischen Verschiebungen im Falle der elektrischen Kräfte (113). Sie erfolgt durch Wirkung eines schon vorhandenen Magnetfeldes, welches wir das angewandte Feld nennen wollen, sei es beim Streichen (229) mittels eines Magnetstabes oder -steines oder beim Einbringen des zu magnetisierenden Eisens in das Feld zwischen die Pole irgendeines Magneten. Sind die Elementarmagnete durch Drehung geordnet, so haben sie die Polrichtung wie ein Kraftlinienzeiger (238); das Bündel ihrer inneren Kraftlinien ist dann den Kraftlinien des angewandten Feldes gleichgerichtet.

Diese gleichgerichteten Kraftlinien der Elementarmagnete kommen dann zu den Kraftlinien des angewandten Feldes hinzu und verstärken es. Dies ist **die Vervielfältigung der Kraftlinien durch Wirkung des Eisens aufs μ-fache** (250, 251, 302); sie besteht darin, daß das Eisen zu je einer von außen gegebenen Kraftlinie noch $\mu - 1$ Kraftlinien seiner Elementarmagnete hinzugibt, die dann dem Gesamtfelde sich einordnen. Diese $\mu - 1$ Kraftlinien können bei Stahl oder nicht ganz weichem Eisen ganz oder teilweise bestehen bleiben, wenn die von außen gegebene Kraftlinie fortgenommen wird; dies ist die „Remanenz" des Stahls oder nicht genügend weichen Eisens.

Man sieht daraus, wie **alle Kraftlinien eines Stahlmagneten** oder auch Magnetsteines nur Eigenkraftlinien seiner ihm zugehörenden Elementarmagnete sind; sie stammen also **aus seinen Atomen**. Verständlich ist auch, daß Erwärmung und Erschütterung während des Magnetisierens, z. B. durch Streichen, förderlich sind, indem sie die Drehungsmöglichkeiten der Elementarmagnete begünstigen. Dabei können sich die Elementarmagnete zu Ketten zusammenschließen, wie Abb. 4 es schematisch darstellt, was bei zunehmendem angewandtem Feld und damit zunehmender Ausrichtung sämtlicher vorhandener Elementarmagnete stattfinden kann. Wenn dieses Zusammenschließen nach Länge und Breite im ganzen Volum eines Eisen- oder Stahlstabes stattgefunden hat, indem derselbe in einem genügend starken Magnetfelde sich befindet, so gehen die äußeren Felder der Elementarmagnete ganz ins Äußere des Stabes über, und sein Inneres ist von den inneren Feldern der Elementarmagnete erfüllt. So entsteht das Kraftfeld eines Eisen- oder Stahlmagnetstabes als Summe der Einzelfelder seiner Elementarmagnete. Die Kraftlinien im Inneren des Stabes geben überall die durchschnittliche Richtung der Polverbindungslinien oder Achsen der Elementarmagnete an. Alle magnetischen Einzelflüsse der gleichgerichteten Elementarmagnete haben sich dann zum magnetischen Fluß (256) des ganzen Stabes vereinigt.

258. Veränderlichkeit der Permeabilität des Eisens. — Man sieht aus dem Vorhergehenden, daß die Permeabilität, μ (oder vielmehr $\mu - 1$) Maß der Drehungswirkung eines

Feldes auf die Elementarmagnete des Stoffes ist. Ist diese Wirkung nicht proportional der angewandten Feldstärke, so erscheint dies als *Abhängigkeit der Permeabilität von der Feldstärke*. Dies kommt besonders bei den Stoffen mit großer Permeabilität, Eisen, Nickel und Kobalt, vor. Ist das Feld schwach, so kann es sein, daß die Elementarmagnete gar keine Drehung erfahren, indem sie durch die Molekularkräfte festgehalten sind („Koerzitivkraft"); dann hat das Eisen auch keinen Einfluß auf das Feld und es ist $\mu = 1$. Dies trifft bei den meisten Eisensorten zu; sie entwickeln ihre große Permeabilität erst in Feldern von gewisser Stärke. Nur wenig Stoffe die großer Permeabilität fähig sind zeigen dieselbe schon bei schwachen Feldern (besitzen wenig „Koerzitivkraft"), so weiches (und reines) Eisen, sowie gewisse Eisen-Nickel-Legierungen und andere Legierungen (vgl. 312). Sobald bei steigendem Feld die Ordnung der Elementarmagnete beginnt und dann weiter fortschreitet, tritt merkliche und dann steigende Permeabilität ein, letzteres wohl mit zunehmender Kettenbildung (257) der Elementarmagnete zusammenhängend. Die Drehungen und die Kettenbildung haben aber in der vollständigen Gleichrichtung eine Grenze; daher erreicht μ mit steigendem Feld bald einen Höchstwert, um dann bei sehr hohen Feldstärken langsam zu sinken, wenn nur wenig eigene Kraftlinien von noch weiter drehbaren Elementarmagneten mehr hinzukommen können. Das Eisen ist dann mit Magnetismus „*gesättigt*"; seine Permeabilität ist wieder klein geworden.

Der bei mäßigen Feldern eintretende Höchstwert der Permeabilität ist stark abhängig von der molekularen Beschaffenheit des Eisens und von fremden Bestandteilen in ihm; er beträgt bei gewöhnlichem Schmiedeeisen etwa $\mu = 3000$ (in Tab. 49 ist 2000 eingetragen als Durchschnittswert für mittlere, der Sättigungswirkung ferne Felder).

Wenn Eisen einem in Stärke und Richtung schnell *wechselnden Magnetfeld* ausgesetzt ist, wie z. B. in den Drehankern (Läufern) der Dynamomaschinen und Elektromotoren und in Transformatoren, so wird mangelhaftes Folgen der Elementarmagnete unerwünscht merklich: Es ist das Koerzitivkraft und Remanenz in Zusammenwirkung (auch „Hysteresis" genannt). Es tritt dann auch Erwärmung des Eisens ein, was anzeigt, daß die Elementarmagnete bei ihren Drehungen die Eisenmoleküle mitbewegen. Dies ist nicht verwunderlich, da die Elementarmagnete doch ohne Zweifel in oder an Eisenmolekülen sitzen. Weit mehr bemerkenswert ist es, daß diese Erwärmung bei geeignetem, genügend weichem Eisen auch sehr gering sein kann, was die Möglichkeit schneller Drehungen der Elementarmagnete ohne starke Mitbewegung der Eisenmoleküle (Atome) anzeigt (vgl. 304).

Die *Permeabilitäten sinken im allgemeinen mit steigender Temperatur*, was als Störung der Ordnung der Elementarmagnete durch die Wärmebewegung aufgefaßt werden kann. Doch kann die größere Beweglichkeit der Atome bei höherer Temperatur auch günstig für Ordnung und für Kettenbildung der Elementarmagnete wirken (Koerzitivkraft überwinden helfen), was einem bei geringen Feldern in Eisen beobachteten Steigen der Permeabilität mit steigender Temperatur entspricht.

Als etwas Besonderes tritt bei Eisen eine *sehr plötzliche Abnahme* der Permeabilität fast bis zu $\mu = 1$ ein, wenn Rotglut überschritten wird; Eisen wird dann vom Magneten gar nicht mehr angezogen. Es sind Zeichen dafür vorhanden, daß bei dieser Temperatur des Verschwindens der Permeabilität molekulare Änderungen im Eisen vor sich gehen, bestehend im Zerfall von Atomgruppierungen, und dies zeigt an, daß die beim Eisen so besonders stark ausgebildeten *Elementarmagnete solchen komplexen, vielatomigen Gruppen* angehören (vgl. 312). Auch Nickel verliert bei heller Rotglut seine große Permeabilität, Kobalt erst nahe der Gelbglut.

Erdmagnetismus.

259. *Die Magnetnadel.* — Es sind hier noch Kenntnisse aus ältester Zeit über den Magnetismus nachzutragen.

Man fand früh, daß Magnetsteine und auch künstliche Magnete, so aufgehangen oder auf einer Spitze unterstützt, daß die Verbindungslinie ihrer Pole horizontal zu liegen kommt, mit dieser Verbindungslinie von selber in die Meridian-

richtung sich einstellen. Der eine Pol weist somit nach Norden, der andere nach Süden. Dies war lange in Benutzung als Orientierungsmittel bei bedecktem Himmel, besonders zur Schiffahrt ins freie Meer. Kolumbus Entdeckungsfahrten nach dem Westen waren auch nur in dieser Weise, mittels der „Magnetnadel", möglich.

Der nach Norden weisende Pol ist es, welcher „Nordpol" der Nadel genannt wird, der nach Süden weisende „Südpol" (230). Früh bemerkte man auch, daß die Magnetnadel nur nahezu, nicht genau in den Meridian sich einstellt. Die Richtung, welche die Polverbindungslinie der Nadel — ihre geradlinige Kraftlinie — annimmt, wird der „magnetische Meridian" genannt; der Winkel desselben mit dem wahren oder astronomischen Meridian heißt Deklination.

Wird eine Magnetnadel in ihrem Schwerpunkt unterstützt, wie es bei dem Kraftlinienzeiger, Abb. 5, schon vorausgesetzt wurde, so stellt sie sich zwar ebenfalls in die Ebene des magnetischen Meridians ein, aber nicht horizontal, sondern (in Europas Breiten) mit dem Nordpol schräg nach unten weisend; ihr Winkel mit der Horizontalen wird Inklination genannt. Es ist danach klar, daß die gewöhnliche, horizontale Magnetnadel außerhalb ihres Schwerpunkts unterstützt sein muß, um horizontal zu sein.

260. Horizontalkomponente des Erdmagnetismus. — Aus alledem geht hervor, daß an der Erdoberfläche ein Magnetfeld vorhanden ist. Der im Schwerpunkt unterstützte Kraftlinienzeiger, die „Inklinationsnadel", gibt die Richtung der Kraftlinien dieses stets vorhandenen Feldes an. Das Feld ist schwach, so daß es die Benutzung des Kraftlinienzeigers in den meist viel stärkeren Feldern von künstlichen Magneten kaum stört. Die auf den Einheitspol P wirkende Kraft K (Abb. 15) des Erdfeldes, welche die Richtung der Inklinationsnadel hat, nämlich in der Ebene des magnetischen Meridians liegt und unter dem Inklinationswinkel i zur Horizontalen geneigt ist, gibt die Stärke des magnetischen Erdfeldes an (237, 238). Diese Kraft kann in die horizontale Komponente H und die vertikale V zerlegt werden. Bei der gewöhnlichen Magnetnadel und bei jedem horizontal aufgehängten Magnetstab ist der vertikalen Komponente durch die Schwerkraft das Gleichgewicht gehalten, und es wirkt auf solche Magnete nur die horizontale Komponente. Mit dieser Horizontalkomponente H hat man gewöhnlich zu tun, da man am einfachsten horizontale, um die vertikale Achse des Aufhängefadens drehbare Magnete benutzt.

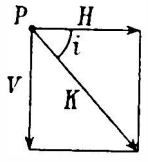


Abb. 15. Horizontale und vertikale Komponente der Erdkraft K.

Man kann, der Parallelogrammzerlegung entsprechend, die wirklich vorhandenen, in Richtung von K laufenden Kraftlinien stets ersetzt denken durch vertikale und durch horizontale Kraftlinien, und man hat im Falle des horizontalen Magneten nur die letzteren wirkend.

Kennt man H und den Inklinationswinkel i, so ist auch die Gesamtfeldstärke $K = H/\cos i$ bekannt.

261. Kraftfeld der Erde. — Früh wurden, schon der Schiffahrt wegen, Deklination und Inklination auf der ganzen zugänglichen Erdoberfläche untersucht. So war ein Überblick gewonnen über die Verteilung der Kraftrichtung an der Erdoberfläche. Abb. 16 zeigt ein in den Raum hinaus ergänztes Bild hiervon.

Man sieht das Kraftfeld einer ziemlich symmetrisch zum Äquator magnetisierten Kugel. Ihre Pole sind nahe bei den geographischen Polen, und nach der einmal festgelegten Bezeichnung der magnetischen Pole (230, 259) ist der geographische Nordpol der Erde ein magnetischer Südpol und der geographische Südpol ein magnetischer Nordpol. Die Hauptverteilung der Inklination, entsprechend der Neigung der Kraftlinientangenten an der Erdoberfläche, ist einfach 0^0 beim Äquator, 45^0 und mehr in mittleren Breiten, 90^0 nahe den Polen. Abweichungen von der symmetrischen Verteilung, sowie die Deklination sind Folge des nur ungefähren Übereinstimmens der magnetischen Pole mit den geographischen Polen und von örtlichen Einflüssen (Permeabilitäten und Eigenmagnetismen der Oberflächenstoffe). Inklination sowie Deklination ändern sich auch von Jahr zu Jahr und im feineren sogar stündlich. Die Haupterkenntnis: „Die Erde ein großer Magnet" war schon Gilbert eigen (1600). Nach der Ursache wird man vielleicht später besser fragen können.

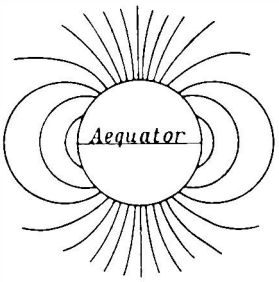


Abb. 16. Magnetfeld der Erde.

Alle Eisenmassen haben den zu erwartenden Einfluß (250) auch auf die Kraftlinien des Erdmagnetfeldes; sie konzentrieren dieselben in sich, wie die Kugel in Abb. 87 (Bd. III, vgl. 253). Sie verstärken dadurch das Feld an den Eintritts- und Austrittsstellen der Kraftlinien und nehmen dort selbst Pole an; ringsum seitlich schwächen sie das Feld. Stahlkörper können die Pole behalten; Meißel, die lange in Inklinationsrichtung gehalten benutzt worden sind, werden gute Magnete, Nordpol unten, Südpol oben. Seit Schiffe meist aus Eisen bestehen, ist der Kreiselkompaß (M 242) für sie zuverlässiger als die Magnetnadel.

Das System der absoluten Einheiten.

262. Masse als Grundeinheit. — Das stete Vorhandensein des Erdmagnetfeldes in allen Räumen, in welchen andere Magnetfelder untersucht werden sollen, sowie auch die Schiffahrt machten es erwünscht, nicht nur die Richtung der magnetischen Erdkraft (Deklination und Inklination), sondern auch ihre Größe bzw. die Horizontalkomponente derselben (260) auf der ganzen Erdoberfläche zu kennen. Für letzteren Zweck war ein einheitliches, unveränderliches oder doch überall immer wieder unverändert herstellbares Einheitsmaß für magnetische Kraft (237) und somit für Kraft überhaupt erforderlich. Die Mängel der irdischen oder technischen, auf die Schwerkraft gegründeten Krafteinheit, des Gramm-Gewichts (M 192), veranlaßten Gauß (1832), von dieser Krafteinheit gänzlich abzugehen und eine neue — nicht von geographischer Breite und Meereshöhe abhängige, überhaupt nicht auf besondere irdische Umstände bezogene — „absolute" Krafteinheit einzuführen. Von dieser ausgehend war dann nicht nur eine ebenso absolute Einheit der Magnetfeldstärke, sondern überhaupt ein ganzes System „absoluter" Einheiten aller vorkommenden Größen irgendwelcher Art zu verwirklichen. Wir haben Einheiten dieses Systems schon öfter benutzt; hier soll zunächst der Grundbau dieses Einheitssystemes entwickelt werden (262—265), um danach auf die besondere Aufgabe der Magnet-

feldmessung in diesen Gaußschen Einheiten zurückzukommen (266—272), die ihrerseits Grundlage des später zu entwickelnden weiteren Aufbaues des gesamten elektrischen Einheitssystems geworden ist (vgl. 264, 265).

Das absolute System geht bei der Wahl der Grundeinheiten (M 12) von Länge, Masse und Zeit aus, nicht — wie das irdische System — von Länge, Kraft und Zeit. Länge und Zeit behalten das Zentimeter und die Sekunde als Einheiten; das Neue ist die Einführung einer Masseneinheit als Grundeinheit, während das irdische System eine abgeleitete Masseneinheit benutzt (M 131). Diese neue Einheit der Masse ist die Masse von 1 cm^3 Wasser größter Dichte (4°C). Es ist dies die Masse eines Gramm-Gewichtstückchens, wie es in jedem Gewichtssatz sich findet; jedoch ist jetzt nicht das je nach dem Standort verschiedene, im freien Himmelsraum ganz verschwindende Gewicht des „Grammes" das Bedeutungsvolle an ihm, sondern seine Masse, d. i. seine Trägheit, sein Sträuben gegen Beschleunigung (M 55). Während also „cm" und „sek" im absoluten System dieselbe Bedeutung haben, wie im irdischen, hat das „gr" hier eine andere Bedeutung; es ist nicht Gewichts-, nicht Kraft-Einheit, sondern Masseneinheit. Will man Verwechselungen der zweierlei Bedeutungen des „gr" ausschließen, so kann man die Bezeichnungen „gr-Gewicht" oder „gr irdisch" und „gr-Masse" oder „gr absolut" wählen; es ist jedoch in den allermeisten Fällen leicht ersichtlich, welches Einheitssystem im gegebenen Falle benutzt ist und was daher „gr" bedeutet.

Auf diese drei Grundeinheiten: cm, gr, sek (CGS) bauend entwickelt sich das ganze System der absoluten Einheiten, das „CGS-System".

Der Fortschritt des absoluten Einheitssystems gegenüber dem irdischen oder technischen liegt in der Güte, in der Unveränderlichkeit, im Absoluten seiner Masseneinheit als Grundeinheit; denn alle anderen, abgeleiteten Einheiten irgendeines Systems sind nur ebenso unveränderlich — oder veränderlich — wie die Grundeinheiten. In der Tat haben sich materielle Massen, bei allen Erfahrungen der Mechanik, besonders auch der Himmelsmechanik, unter höchst verschiedenen Umständen als zeitlich und örtlich unveränderlich gezeigt im Gegensatz zu den auf sie wirkenden, von den Massen der Umgebung und deren Abständen abhängigen Gravitationskräften. Heutige Kenntnis läßt allerdings keinen Zweifel daran, daß Massen auch bei ungeänderter Anzahl ihrer Atome Veränderungen erleiden, wenn ihr Energieinhalt sich ändert; denn Energie hat Masse (434). Diese Veränderlichkeiten der Massen sind jedoch winzig im Vergleich zu den Veränderlichkeiten der Gewichte. Hebt man z. B. ein Kilogrammgewichtsstück auf Erden um 1 m, so hat sein Gewicht oben, da es weiter vom Erdmittelpunkt entfernt ist, nach dem Entfernungsquadratgesetz (M 205 u. f.) um rund $^1/_3$ Milligramm abgenommen; seine Masse hat zugenommen, aber nur um 10^{-9} Milligramm, welches die Masse der von ihm aufgenommenen Hebearbeit ist (587, 591).

263. Neue Krafteinheit. — Die Entwickelung des CGS-Systems aus den drei Grundeinheiten ist in Abb. 17 von oben nach unten hin fortschreitend dargestellt. Die unteren Teile der Abbildung (vom Pol an) gehören dabei der „elektromagnetischen" Sonderentwicklung an (264), in welcher zuletzt (von Strom und Spannung an) auch Vielfache der Grundeinheiten benutzt werden (QUS-System, 292), worauf der Reihe nach einzugehen sein wird.

Zunächst geben die Einheiten der Länge und der Zeit zusammen die Einheit der Geschwindigkeit als die Geschwindigkeit 1 cm/sek, und diese Geschwindigkeitseinheit gibt zusammen mit der Zeiteinheit die Einheit der Beschleunigung als die Beschleunigung von (1 cm/sek)/sek = 1 cm/sek². Beides wie im irdischen System (M 38, 51).

Nun entwickelt sich weiter die neue Krafteinheit aus der Verbindung der Beschleunigungseinheit mit der neuen Masseneinheit nach dem Grundgesetz aller Bewegung (M 115) als diejenige Kraft, welche der Masseneinheit die

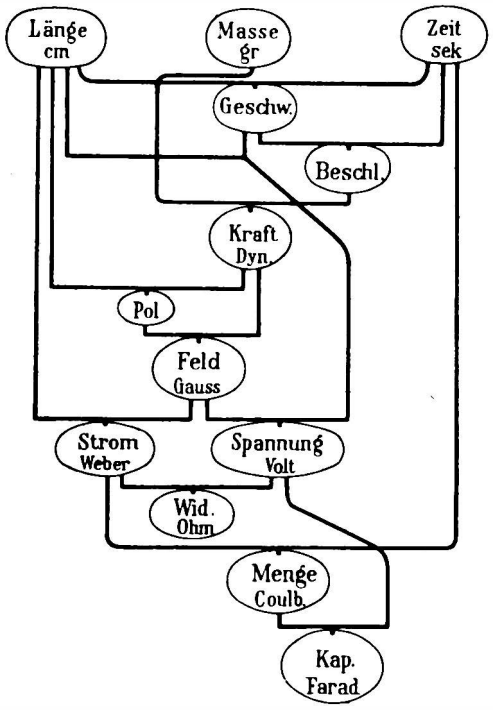


Abb. 17. System der absoluten elektromagnetischen Einheiten.

Einheit der Beschleunigung beibringt, welche also 1 sek lang auf 1 gr wirkend, dessen Geschwindigkeit um 1 cm/sek ändert. Diese Krafteinheit, Dyn (dyn) genannt, ist eine sehr kleine Kraft; sie ist etwa gleich 1 mgr (genauer 1/g gr) irdisch (M 192).

Man sieht, daß man zur Messung von Kräften unmittelbar in dyn diese Kräfte Beschleunigungen hervorbringen lassen muß, d. h. daß man sie in Bewegungsvorgängen wirken lassen muß. Dies ist die „dynamische Kraftmessung" (s. das Beispiel in 268), im Gegensatz zur „statischen", welche letztere für Messung in irdischen Einheiten, durch Gleichgewichtsherstellung mit der Schwerkraft, z. B. auf der Waage, das passendste ist (M 67). Allerdings kann, wenn man eine Kraft erst statisch in gr-Gewicht gemessen hat, sie nachher immer in dyn umgerechnet werden, wenn man die Schwerebeschleunigung g am Ort der Messung kennt.

Aus der absoluten Krafteinheit, dem dyn, ergibt sich unmittelbar auch die absolute Energie- oder Arbeits-Einheit, das cmdyn, auch Erg genannt. Es ist ungefähr $1\,\mathrm{erg} = 10^{-8}\,\mathrm{mkgr}$ irdisch.

264. Elektrostatische und elektromagnetische Einheiten. — Die weitere Entwickelung des absoluten Einheitssystems, für die elektrischen Größen, kann von hier ab auf zweierlei Wegen erfolgen. Entweder man setzt mittels der neuen Krafteinheit eine Einheit der Elektrizitätsmenge fest, gestützt auf Coulombs Gesetz für Elektrizitäten (14), wie bereits erläutert (15), und geht von da aus weiter; oder man setzt einen magnetischen Einheitspol fest, gestützt auf Coulombs Gesetz für Magnetpole (231), um dann von diesem aus weiterzugehen. Der erste Weg gibt das System der absoluten elektrostatischen Einheiten oder kurz die „elektrostatischen CGS-Einheiten"; der zweite Weg gibt das System der absoluten elektromagnetischen Einheiten oder kurz die „elektromagnetischen CGS- (bzw. QUS-) Einheiten".

Wir haben die elektrostatischen CGS-Einheiten der Menge, der Spannung, der Kapazität bereits benutzt (15, 33, 50) und hierbei ihre Festlegungsweise erläutert. Die allgemeinstgebräuchlichen elektrischen Einheiten, das Weber oder Ampère, Volt, Ohm, Coulomb, Farad, welche wir ebenfalls bereits eingeführt und benutzt haben, gehören aber dem elektromagnetischen System an, das auch Gauß bevorzugte, da er vor allem magnetische Größen messen wollte, und dessen Begründung wir nun hier eingehend betrachten wollen. Auch die Abb. 17 bezieht sich von der Krafteinheit an abwärts ausschließlich auf das elektromagnetische System.

265. Das ganze elektromagnetische Einheitssystem gründet sich auf Festsetzung eines „Einheitspoles", einer Einheit der „magnetischen Menge", eines Dings, das es allerdings bekanntlich gar nicht gibt (232). Gauß empfand sehr wohl die hierin liegende Schwierigkeit. Es war aber für „magnetische Mengen" oder Polstärken Coulombs Gesetz da[1]), das — mit Vorsicht angewandt — als der Wirklichkeit entsprechend befunden war und von Gauß auch besonders nachgeprüft wurde (269). Die Schwierigkeit — die Unbestimmtheit und Unsicherheit der Rechnung mit unwirklichen Dingen — wußte Gauß vollkommen zu umgehen, indem er alsbald nicht mit einzelnen Polen, sondern nur mit Magnetstäben rechnete, die ihre zwei Pole haben, und indem er sich von Angaben bestimmter Punkte, an welchen diese zwei Pole sitzen sollten, vollkommen unabhängig machte durch Einführung des Begriffs des „magnetischen Moments" eines Stabes (266). Dieser Weg ist nun weiter zu erläutern.

Einheitspol ist der Pol, welcher einen ihm gleichen im Abstand von 1 cm mit der Kraft 1 dyn abstößt. Abb. 17 zeigt diese Verbindung der neuen Krafteinheit mit der Längeneinheit an, aus welcher somit, durch Coulombs Gesetz, die Poleinheit hervorgeht.

Mit der Festlegung des Einheitspoles ist auch die Einheit des Magnetfeldes gegeben. Denn das Feld wird durch die Kraft gemessen, die es auf den Einheitspol ausübt (237). Feld Eins ist das Feld, in welchem der Pol Eins die Kraft Eins (1 dyn) erfährt; Abb. 17 zeigt dementsprechend Verbindung der Poleinheit mit der Krafteinheit als Ursprung der Feldeinheit an. Es ist für

[1]) Die Kenntnis von Faradays Kraftlinien war damals erst am Anfang ihrer Entwickelung.

diese absolute CGS-Magnetfeldeinheit (etwas spät) der Name „1 Gauß" in Gebrauch gekommen, und es werden Magnetfelder jetzt meist in Gauß angegeben[1]).

Da die Magnetfeldstärke im materiefreien Raum stets durch die Zahl der Kraftlinien auf der ihnen senkrecht gegenübergestellten Flächeneinheit gegeben sein soll (244), so ergeben sich für den Einheitspol 4π Kraftlinien. Es folgt dies in ganz derselben Weise, wie die Zahl 4π der elektrischen Kraftlinien für die elektrische Mengeneinheit im elektrostatischen CGS-System (74). Ein Magnetstab mit Polen von der Stärke m hat demnach 4πm Kraftlinien in seinem Inneren vereinigt und nach außen herum verbreitet, jede derselben in sich geschlossen (255), wie es die Abb. 14 zeigt.

Wir verfolgen die in Abb. 17 angezeigte weitere Entwickelung des absoluten elektromagnetischen Einheitssystems später (289, 353, 354) und beschäftigen uns jetzt mit der Messung von Magnetfeldern in Gauß (266—272).

266. Magnetisches Moment. — Es käme darauf an, die Kraftwirkung auf den Einheitspol an der zu messenden Feldstelle zu ermitteln (265). Da es aber nur Magnete mit zwei Polen gibt, ist ein Magnetstab zu benutzen, der kurz genug ist, um mit beiden Polen an der betreffenden Feldstelle Platz zu finden. Es sei in Abb. 18 das zu messende Feld von der Stärke H durch die parallelen Kraftlinien dargestellt; der benutzte Magnetstab m m sei senkrecht zu den Kraftlinien gerichtet und sei um eine durch seine Mitte gehende Achse drehbar, die senkrecht zum Stab und zu den Kraftlinien steht. Der Stab erfährt dann ein Drehmoment (M 96), herrührend von den auf seine beiden Pole wirkenden, in der Abbildung gezeichneten Kräften. Ist die Polstärke des Magneten m und der Abstand seiner beiden Pole l, so ist das ganze Drehmoment $D = 2 \cdot m \cdot H \cdot l/2 = mlH$. Die Größen m und l gehören dem Magnetstab an; sie sind einzeln schlecht zu ermitteln, ja sogar schlecht bestimmt, weil die Pole, die Konvergenzstellen der Kraftlinien des Magneten (241), niemals genau punktförmig sind; wohl aber hat das Produkt $m \cdot l$ eine fest bestimmte, dem Magnetstab angehörende Größe, weil der Stab im gegebenen Magnetfeld H jenes bestimmte, nur von H und ml abhängige Drehmoment erfährt. Auch sonst ist das Produkt ml, Polstärke mal Polabstand, bestimmend für die Wirkungen des Magnetstabes, z. B. auf andere Magnete (vgl. 269); es ist daher die Hauptgröße beim Rechnen mit Stahlmagnetstäben und hat den besonderen Namen „magnetisches Moment" erhalten. Bezeichnen wir es mit $M = ml$, so ist das betrachtete Drehmoment $D = M \cdot H$.

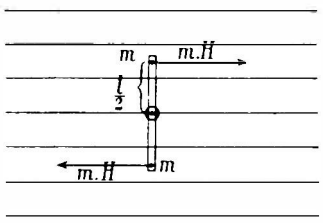


Abb. 18. Magnetisches Moment.

Es ist leicht einzusehen, daß das Rechnen mit dem magnetischen Moment als einer unveränderlichen, einem Magnetstab zugehörigen Größe auch bei beliebiger Beschaffenheit seiner Kraftlinien einwandfrei ist, wenn er nur die Kraftlinien unverändert behält, also ein guter Magnetstab mit gehöriger Koerzitivkraft ist. Es kommt nicht darauf an, ob die Pole punktförmig

[1]) Statt „Gauß" findet man manchmal auch „Örsted" gesagt. Man liebt es neuerdings, mehr Namen und Einheiten zu machen als nötig ist (s. 254), was den Eingang in die Wissenschaft verdüstert.

sind; es können die Kraftlinien auch von einer Reihe von Punkten aus divergieren; es würde dann $M = \Sigma ml$ sein, da die Einzeldrehmomente sich summieren (M 97). Man kann in dieser Weise das magnetische Moment eines Stabes überhaupt als Summe der magnetischen Momente aller seiner (gerichteten) Elementarmagnete ansehen. Sind die Elementarmagnete durchs ganze Volum des Stabes gleichmäßig gerichtet, so hat es auch guten Sinn, den Quotienten aus magnetischem Moment und Volum, das magnetische Moment der Volumeinheit des Stabes, zu bilden und hiernach etwa magnetische Momente beliebiger Teile des Stabes zu berechnen oder die Vollkommenheit seiner Magnetisierung zu beurteilen.

267. Messung der Horizontalkomponente H des Erdfeldes (260). — Diese Messung ist vor allem wichtig wegen des steten Vorhandenseins des Erdfeldes; wir betrachten sie daher zuerst, wie sie auch zuerst entwickelt worden ist, um dann auch auf Messung anderer Magnetfelder einzugehen (272).

Es kommt darauf an, das Drehmoment $M \cdot H$ eines um eine vertikale Achse drehbaren, z. B. an einem Faden aufgehängten Magnetstabes zu messen (268). Da das magnetische Moment M des Stabes zunächst unbekannt ist, erfordert die Sonderung der beiden Unbekannten M und H dann noch eine besondere, zweite Messung (269).

268. Die Messung des Drehmoments $D = M \cdot H$ könnte statisch erfolgen durch Gleichgewichtsherstellung mit einem Drehmoment der Schwerkraft. Abb. 19 zeigt dies in Ausführung,

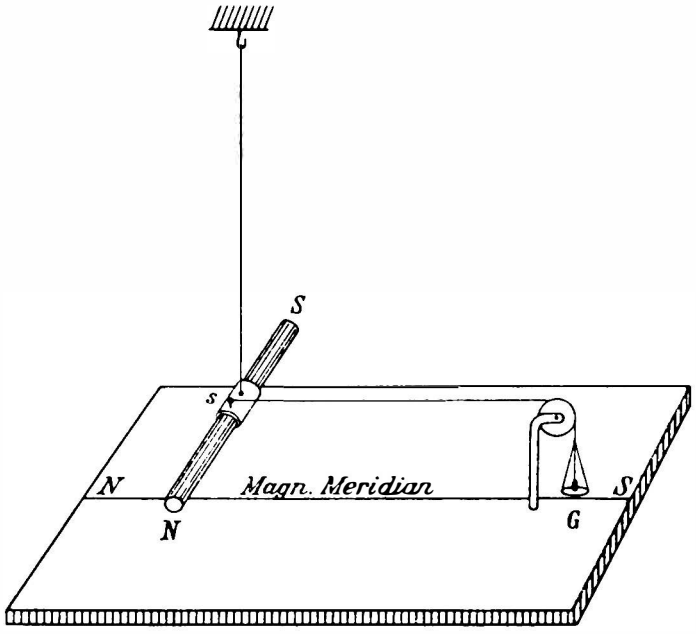


Abb. 19. Statische Messung von $M \cdot H$.

wobei die in Abb. 18 schon betrachtete Senkrechtstellung des Magneten NS zur Kraftrichtung, d. i. hier zum magnetischen Meridian, bei Drehbarkeit des Magneten um den vertikalen Aufhängefaden verwirklicht ist. Die Schale G mit Gewichten zieht über die Rolle an dem Faden, der um eine kleine Strecke s seitlich vom Aufhängefaden am Magneten befestigt ist. Bei richtiger Bemessung des Gesamtgewichts von G bleibt der Magnet in der Senkrechtstellung zum Meridian, obgleich die Horizontalkomponente ihn mit dem Pol N in die Nordrichtung des Meridians zu bringen strebt. Es ist dann $M \cdot H = Gs$, wobei freilich, um auf absolutes Maß zu kommen, G von gr-

Gewicht in dyn umgerechnet werden muß. Dies erfolgt zwar leicht mittels der Kenntnis der Schwerebeschleunigung g am betreffenden Ort (M 191, 210); aber die Genauigkeit solchen statischen Verfahrens ist zumindest durch die Reibung an der Rolle beeinträchtigt, und g erforderte für äußerste Genauigkeit doch eine Pendelmessung (M 190) an Ort und Stelle.

Gauß hat die dynamische Messung des Drehmoments $D = M \cdot H$ vorgezogen. Man läßt dazu den am Faden hängenden Magnetstab frei um seine Gleichgewichtslage, den magnetischen Meridian, Schwingungen ausführen und mißt die Schwingungsdauer T. Es gilt für dieselbe, wie für jede drehende Schwingung (M 185) $T = 2\pi\sqrt{M/k}$. Das Trägheitsmoment M wird durch Zusatzmassen bestimmt bzw. eliminiert (M 187); die Direktionskraft k ist, wie leicht einzusehen, für kleine Amplituden eben gleich dem gesuchten Drehmoment $D = M \cdot H$, welches somit berechenbar wird. Sind alle Längen in cm, alle Massen in gr und alle Zeiten in sek gemessen, so ergibt sich $M \cdot H$ unmittelbar in absolutem CGS-Maß.

269. Zur gesonderten Berechnung von M und H wird nach Gauß durch eine zweite Messung der Quotient M/H bestimmt. Man läßt dazu den vorher benutzten Magneten NS, mit dem magnetischen Moment M, ablenkend auf eine Magnetnadel N_1S_1 wirken, wie es Abb. 20 von oben gesehen zeigt, und mißt den Ablenkungswinkel α, sowie den Abstand r der Mitte des Magnetstabes vom Drehpunkt der Magnetnadel. Diese Nadel N_1S_1 steht ohne Anwesenheit des Magneten NS im magnetischen Meridian; beim Hinzukommen des Magneten, der senkrecht zum Meridian stehe[1]) und gegen die Nadel hin gerichtet sei, wie es die Abbildung zeigt, wird die Nadel in die Lage $N'_1 S'_1$ abgelenkt. Es ist dies als Wirkung der beiden Pole N und S des Magneten auf die beiden Pole der Nadel nach Coulombs Gesetz berechenbar. Der Sinn der Rechnung ist demnach sehr einfach; ihre Durchführung wird umständlich, ausgenommen im Falle großen Abstandes r der beiden Magneten, so daß die Längen (Polabstände) derselben sehr vielmal kleiner sind als r. Dieser Fall großen Abstandes r bietet aber auch allein gesicherte Grundlagen für die Rechnung; denn die punktförmigen Magnetismen an den Polen gibt es nicht, was besonders bei kleinen Abständen r sehr merklich wird. Bei großen Abständen konnte dagegen Gauß durch besondere Messungen mit Benützung verschiedener Abstände und auch veränderter Lagerung der Magneten nachweisen, daß die Rechnung mit punktförmigen Polen nach Coulombs Gesetz um so genauer gilt, je größer die Abstände sind, und dies war auch Gauß' bereits erwähnte verfeinerte Nachprüfung von Coulombs magnetischem Kraftgesetz.

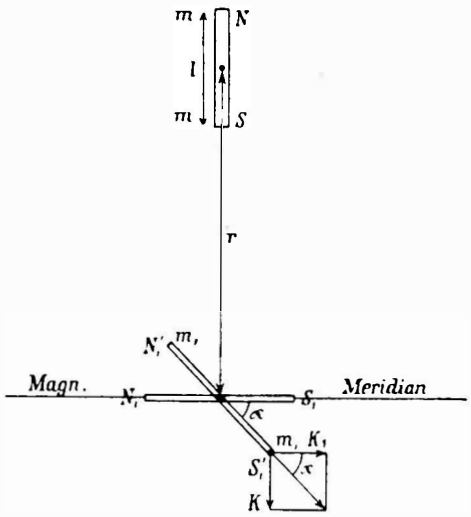


Abb. 20. Messung von M/H.

Bei der Rechnung mit einem gegen die Magnetlängen sehr großen Abstand r kann man die beiden Pole N_1 und S_1 der Nadel gleichweit entfernt vom Magneten annehmen, nämlich eben im Abstand r, um so mehr als dann der Winkel α sehr klein ausfällt. Dann sind die vom Magneten auf diese beiden Pole ausgeübten Kräfte einander gleich und nur entgegengesetzt gerichtet. Die eine dieser beiden Kräfte, auf S_1 wirkend, ist in der Abbildung dargestellt und mit K bezeichnet. Sie ist die Differenz der zwei Kräfte, welche die beiden Pole N und S des Magnets auf S_1 ausüben. Diese Kraftdifferenz K ist nur deshalb nicht Null, weil der eine Magnetpol S näher der Nadel ist als der andere N, nämlich um l, den Polabstand des Magneten. Die Kraft ist beim

[1]) Bei der Messung von $M \cdot H$ (268) war der Magnetstab im Meridian. Die Verschiedenheit der zwei Lagen — im und senkrecht zum Meridian — kann M etwas verschieden machen durch bevorzugte Aufnahme von Kraftlinien des Erdfeldes in Meridianlage des Stabes (vgl. 261), wenn seine Koerzitivkraft nicht genügt. Eine besondere Korrektionsuntersuchung kann dies berücksichtigen.

Abstand r nach Coulombs Gesetz mm_1/r^2, wenn m und m_1 die beiden Polstärken sind, und die Kraftdifferenz K bei Abänderung von r um die gegen r sehr kleine Länge l ist $2mm_1l/r^3$ [1]) Hierin ist aber $ml = M$ das magnetische Moment des Stabes, so daß $K = 2Mm_1/r^3$. Man hat hiermit das allgemein bemerkenswerte Ergebnis, daß die von einem Magneten auf den Pol eines anderen ausgeübte Kraft proportional dem magnetischen Moment M des Magneten und verkehrt proportional der 3. Potenz des Abstandes r ist.

Außer dieser bei der vorausgesetzten kleinen Länge der Nadel in Richtung von r wirkenden Kraft K wirkt noch senkrecht zu dieser, nämlich im magnetischen Meridian, die Erdkraft K_1 auf den Nadelpol m_1, und es ist $K_1 = m_1H$.

Aus den beiden Kräften K und K_1 ergibt sich für den Ablenkungswinkel $\tan g\,\alpha = K/K_1 = 2M/Hr^3$. Die Polstärke m_1 der Nadel ist herausgefallen; sie braucht somit nicht bekannt zu sein. Die Kräfte auf den anderen Pol N_1 der Nadel ergeben beim vorausgesetzten großen Abstand r dasselbe. Man erhält somit den Quotienten $M/H = \frac{1}{2}r^3 \cdot \tan g\,\alpha$ und hat nur r und α zu messen.

Kann wegen Raummangels, oder weil der Winkel α zu klein ausfiele, der Abstand r nicht so groß genommen werden, daß die einfache Rechnung genügend genau gälte, so muß eine verwickeltere Rechnung, übrigens nach ganz denselben Gedanken, vorgenommen werden, wobei auch noch die Polabstände des Magneten und der Nadel mit einiger Annäherung bekannt sein müßten, wenn dies nicht besser durch Messungen in zwei verschiedenen Abständen r umgangen wird.

270. Die so erlangte Kenntnis von $M \cdot H$ und M/H bedeutet zwei Gleichungen für die beiden Unbekannten M und H, womit sie beide ermittelt sind. Dies ist Gauß' Methode sowohl zur Messung des magnetischen Momentes eines Stabes als auch besonders zur Ermittelung der Horizontalkomponente des Erdmagnetismus.

Diese Ermittelung ist sehr wichtig geworden; der ganze weitere Aufbau des absoluten Einheitssystems, die Festlegung des Weber, Volt, Ohm, Farad beruht auf derselben (290, 353, 354). Dieser Aufbau ist heute in jedem käuflichen, geeichten Webermesser, Voltmesser und Widerstandskasten festgehalten, und diese Mittel gestatten jetzt eine einfachere Messung der Horizontalkomponente — wo sie nötig würde — auf umgekehrtem Wege (durch Benutzung der Tangentenbussole, 288, oder des Erdinduktors, 353).

271. Die über die ganze Erde hin gemessene Größe der Horizontalkomponente beträgt für mittlere Breiten in runder Zahl $H = 0{\cdot}2$ Gauß; nach dem Äquator zu steigt sie, gegen die Pole hin nimmt sie ab, was schon aus der Gestalt des Erdfeldes (Abb. 16) unmittelbar zu entnehmen ist. Die Gesamtfeldstärke (260) ist in den mittleren Breiten $H/\cos i = 0{\cdot}2\,\text{Gauß}/\cos 60^0 = 0{\cdot}4$ Gauß. Es ist das ein schwaches Magnetfeld; beste Stahlmagnete haben dicht bei ihren Polen bis zu 1000 Gauß.

Die Schwäche des Erdfeldes gestattet dessen Außerachtlassung bei vielen Beobachtungen stärkerer Felder; so stört beispielsweise das Erdfeld keine Kraftlinienuntersuchung mittels Eisenfeile, die doch nur von stärkeren Feldern genügend beeinflußt wird.

272. Messung anderer Magnetfelder. —

a) Sind schwache Felder zu messen, so richtet man deren Kraftlinien womöglich horizontal und senkrecht zum magnetischen Meridian. Es wirkt dann auf eine Magnetnadel das zu messende Feld unter 90^0 zusammen mit der Horizontalkomponente des Erdfeldes zu einer Resultierenden, in die die Nadel sich einstellt. Findet sich die Nadel z. B. um 45^0 aus dem Meridian abgelenkt, so wäre

[1]) Am einfachsten nach den Regeln der Differentialrechnung als Differential von mm_1/r^2 nach r zu finden, wobei im Ergebnis $dr = 1$ zu setzen ist.

das zu messende Feld gleich der Horizontalkomponente H. Dieser Weg wird beispielsweise bei der Tangentenbussole benutzt (288). Kommt es nicht auf größte Genauigkeit an und ist nicht zu viel Eisen im Gebäude, so kann hierbei H aus Tabellen nach geographischer Länge und Breite entnommen werden.

b) Etwas stärkere Felder können gut durch Schwingungsdauern eines kleinen aufgehängten Magneten (z. B. eines gut magnetisierten Stückes einer Nähnadel, mit etwas Blei beschwert) gemessen werden, wobei wieder das bekannte Erdfeld zum Vergleich dient. Die Felder verhalten sich dann verkehrt wie die Quadrate der Schwingungsdauern (s. die Gleichung in 268).

Will man während der Schwingungsbeobachtung im zu messenden Felde das Erdfeld ausschalten, um es dabei nicht berücksichtigen zu müssen, so kann dies durch einen „Astasiermagneten" geschehen. Es ist dies ein kleiner Stahlmagnetstab, den man in feste Verbindung mit der Aufhängung der schwingenden Nadel in geeignetem Abstand von derselben so anbringt, daß die horizontale Komponente seines Feldes am Orte der Nadel entgegengesetzt gleich der Horizontalkomponente des Erdfeldes wird. Die Nadel hat dann jede Richtkraft, außer der des Aufhängefadens, die man besonders berücksichtigen kann, verloren; sie ist „astatisch" geworden. Man bringt dann die Nadel samt dem Astasiermagneten in unveränderter Orientierung zum Meridian in das zu messende Feld. Die Vergleichsbeobachtung im Erdfeld geschieht in Abwesenheit des Astasiermagneten.

c) Sehr starke Felder kann man so nicht messen, weil sie leicht das magnetische Moment des prüfenden Magneten abändern. Hier ist das beste Mittel die Induktion, worauf wir später zurückkommen (345).

d) Zu Vergleichsmessungen, besonders von starken Feldern, können alle meßbaren Erscheinungen dienen, die überhaupt in bekannter Weise von der Feldstärke abhängen. So die magnetische Drehung der Polarisationsebene (350), die Widerstandsänderung von Wismutdraht im Magnetfeld (318) und die magnetischen Steighöhen (275, 311). Es muß dann eine Eichung in vorher, z. B. durch Induktion, gemessenen Magnetfeldern stattgefunden haben.

Magnetische Energie.

273. Magnetkraftlinien sind, wie die elektrischen Kraftlinien, Linien der Energieverteilung im Äther. — Der Energieinhalt jedes Magnetfeldes geht schon daraus hervor, daß die Kraftlinien durch ihren Zug Arbeit leisten können und daß dabei infolge ihrer Verkürzung ein Teil des Feldes verschwindet, dessen Energieinhalt dann gleich der geleisteten Arbeit ist. So ist es, wenn ein Stahlmagnet seinen Anker anzieht. Wenn, wie in einem Elektromotor, das Magnetfeld dauernd Arbeit abgibt ohne dabei sein Volum zu vermindern, so wird ihm Energie (vom elektrischen Strom) dauernd nachgeliefert (vgl. 376), so daß es Durchgangsort von Energie und also nicht minder energiehaltig ist.

Wir sehen somit in den Magnetkraftlinien eine zweite Verteilungsweise von Energie im Raum, sehr ähnlich der erstbetrachteten Energieverteilung in den elektrischen Kraftlinien (122) und doch in der besonderen Weise (255) verschieden davon.

Elektrische Energie, verteilt und beschaffen wie die elektrischen Kraftlinien, und magnetische Energie, verteilt und beschaffen wie die Magnetkraftlinien, dies sind die beiden Hauptenergieformen. Zusammen werden sie elektro-

magnetisch genannt; in unserer Übersicht der Energieformen, Tab. 42 (119) sind sie kurz als „elektrische Energie" bezeichnet, was gerechtfertigt ist, weil magnetische Energie — wie später zu zeigen (328) — nie ohne elektrische Energie vorhanden ist. Daß auch die anderen vier Energieformen nur besondere Fälle elektromagnetischer Energie sind, darf nach gegenwärtiger Kenntnis wohl gedacht werden (587).

274. Für die Menge der magnetischen Energie in jedem Teil des Feldes muß die jeweilige Feldstärke H maßgebend sein. Da für magnetische wie für elektrische Kräfte in gleicher Weise Coulombs Gesetz gilt und da elektrische und magnetische Kraftlinien dementsprechend weitgehend gemeinsame Eigenschaften haben, so ist zu vermuten, daß die magnetische Energie in der Raumeinheit — die magnetische Energiedichte — in derselben Weise von der örtlichen Magnetfeldstärke H und der Permeabilität μ abhängen wird, wie die elektrische Energiedichte von der elektrischen Feldstärke E und der Dielektrizitätskonstante ε, daß also die magnetische Energiedichte $H^2\mu/8\pi$ sein wird, so wie die elektrische Energiedichte $E^2\varepsilon/8\pi$ war (123).

Dabei muß die magnetische Energiedichte in absoluten Einheiten, d. i. in erg/cm³ sich ergeben, wenn H elektromagnetisch absolut, d. i. in Gauß gemessen ist (265), weil dann sowohl das Feld als die Mengeneinheit, auf welche dessen Maß sich bezieht, dyn als Kraftmaß haben. Ebenso ergibt sich aus demselben Grund die elektrische Energiedichte ebenfalls in erg/cm³, wenn das elektrische Feld E elektrostatisch absolut gemessen ist (65, vgl. 264).

Unmittelbare Prüfung des Ausdrucks für die magnetische Energiedichte durch Berechnung der zur Herstellung eines Magnetfeldes erforderlichen Arbeit aus Kraft und Weg, in derselben Weise wie es für die elektrische Energiedichte geschehen ist (123), ist nicht möglich, weil man wohl elektrische Felder durch Bewegung von Elektrizitätsmengen unter Arbeitsleistung herstellen kann, nicht aber Magnetfelder durch Bewegung magnetischer Mengen, die es nicht gibt. Die unmittelbare Prüfung wird aber mit Zuhilfenahme von Oersteds und Faradays Entdeckungen möglich, worauf wir dann zurückkommen (365), und es ergibt sich in der Tat die magnetische Energiedichte zu $H^2\mu/8\pi$, vollkommen analog der elektrischen Energiedichte.

275. Berechnung von Kräften aus der Energie. — Ebenso wie bei den elektrischen Kräften ist es auch bei magnetischen Kräften oft viel näherliegend, sie aus der Energie des Feldes zu berechnen als nach Coulombs Gesetz. Es gelten hier vollkommen die bereits für den Fall der elektrischen Energie durchgeführten Überlegungen (128), nach welchen die Energiedichte an einer Grenzfläche unmittelbar den Druck an dieser Grenzfläche, d. i. die auf die Flächeneinheit wirkende Kraft angibt. Es ist 1 erg/cm³ = 1 dyn/cm². Ist auf beiden Seiten der Grenzfläche Feld vorhanden, was bei den nicht endenden Magnetkraftlinien immer vorkommt, so gilt für den dann wirksamen Druckunterschied, vollkommen analog dem elektrischen Fall (Gl. 128), $(H^2/8\pi) \cdot (1-1/\mu)$, wenn an der einen Seite der Fläche Vakuum (oder Luft), an der anderen ein Stoff mit der Permeabilität μ ist.

Beispielsweise ist leicht die Kraft angebbar, mit welcher der Anker des Magneten, dessen Kraftfeld Abb. 12 zeigt, vom Pol angezogen wird, wenn das Feld H zwischen Pol und Anker beim vorhandenen Abstand beider bekannt ist. Da μ für das Eisen des Ankers sehr groß ist,

ist $1/\mu$ verschwindend gegen 1 und daher die Kraft an der Flächeneinheit $H^2/8\pi$. Dies gibt z. B. für $H = 1000$ Gauß und 1 cm^2 Feldquerschnitt (Polfläche) rund 40000 dyn oder 40 gr-Gewicht Kraft. Für beide Pole zusammen ist die Kraft verdoppelt.

Ebenso ist die magnetische Steighöhe einer eisenhaltigen Flüssigkeit von der Permeabilität μ im Magnetfeld nach der für den analogen elektrischen Fall schon berechneten Gleichung (128) angebbar; sie ist $h = (H^2/8\pi sg) \cdot (\mu - 1)/\mu$, wobei, wie dort, s das spezifische Gewicht der Flüssigkeit und g die Schwerebeschleunigung ist. Die Beobachtung solcher magnetischen Steighöhen erfolgt am besten mit dem in Abb. 48 ersichtlichen U-förmigen Rohr, dessen einer Schenkel ins Magnetfeld (zwischen die Pole NS) kommt, während der andere draußen bleibt. Man kann die Vorrichtung gut benutzen, um starke Magnetfelder H aus der zu messenden Steighöhe h zu ermitteln, wenn man die Permeabilität μ der Flüssigkeit schon kennt (in einmal anderweitig gemessenem Felde ermittelt hat). Allerdings bedeutet H in dieser Berechnung, entsprechend deren Sinn, das im engen Schenkel über der Flüssigkeit vorhandene Feld, welches durch die Anwesenheit der Flüssigkeit verändert ist (250), so wie die Kugel in Bd. III Abb. 87 das Feld verändert. Jedoch ist diese Veränderung bei den kleinen hier zu benutzenden Permeabilitäten (z. B. $\mu = 1{\cdot}0008$ für Eisenchloridlösung) äußerst gering, während doch gut meßbare Steighöhen auftreten.

II. Elektrodynamik.

1. Die magnetischen Wirkungen elektrischer Ströme.

Ströme und Magnetnadel.

276. Oersteds Entdeckung. — Nach Kenntnis der magnetischen Erscheinungen kann auch deren Zusammenhang mit den elektrischen Vorgängen betrachtet werden. Daß ein solcher Zusammenhang bestehe, war bei den merkwürdigen Ähnlichkeiten der beiden Erscheinungsgruppen früh vermutet worden; wie der Zusammenhang aber wirklich beschaffen sei, dies zeigte erst eine besondere, dem Suchen nach dem Zusammenhang entsprungene Entdeckung: Es zeigte sich, daß der elektrische Strom die Magnetnadel ablenkt (Oersted, 1820).

Die Entdeckung war reich an Folgen; alles bis zu Ende der Elektrizitätslehre noch Vorzubringende und die Fülle der heute geläufigen Anwendungen davon beruht auf ihr.

Geht der Strom eines Voltaschen Elementes durch den Draht A B (Abb. 21), der in Meridianrichtung liege, so verläßt die darüber schwebende Magnetnadel den Meridian; sie stellt sich nahezu quer zum Stromleiter und zwar dies um so vollkommener, je näher der Stromleiter an die Nadel herangebracht wird.

Offenbar verbreitet also der Strom magnetische Kraft in seiner Umgebung, und die Nadel ist dieser und der erdmagnetischen Kraft gleichzeitig ausgesetzt und stellt sich in die Resultierende beider. Je stärker der Strom und je näher er der Nadel ist, desto mehr überwiegt die Stromkraft, die somit ihrer Richtung nach unmittelbar leicht zu studieren ist.

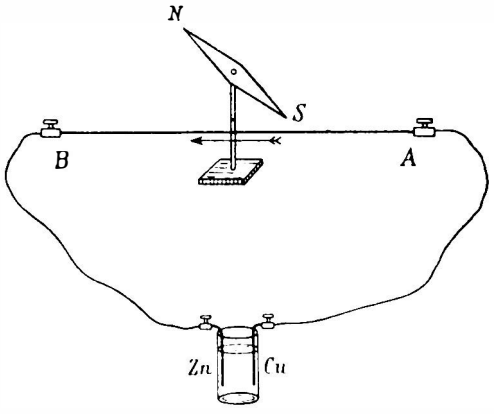


Abb. 21. Oersteds Entdeckungsversuch.

Untersuchung verschiedener Lagen des Leiters zur Nadel zeigt, daß die magnetische Stromkraft stets quer zum Leiter gerichtet ist. Es ist also nicht eine Anziehungs- oder Abstoßungskraft des Stromleiters auf die magnetischen Pole, was sich zeigt, sondern ein Drehmoment auf die Nadel, wobei beide Pole sich gleichweit vom Strom entfernen. Bringt man den Stromleiter über statt unter die Nadel, so wendet sich diese, so daß N und S vertauscht sind; ebenso wenn die Stromrichtung gewendet wird, sei es im Leiter oder auch mit dem Leiter.

Um immer zu wissen, nach welcher Seite hin der Nordpol der Nadel getrieben wird, benutzt man nach den so gewonnenen Erfahrungen die *Handregel*: Man lege die rechte Hand an den Stromleiter, so daß die Finger in Richtung des positiven Stromes liegen und die Handfläche zur Nadel hin gewendet ist; die Kraft auf den Nordpol hat dann die Richtung des ausgestreckten Daumens der Hand. Die Kraft auf den Südpol hat, wie stets, entgegengesetzte Richtung, wodurch das Drehmoment zustande kommt.

Ruhende Elektrizität zeigt keine magnetischen Kräfte; dieselben sind *Wirkung bewegter Elektrizität*, und zwar muß die Bewegung, auf welche es ankommt, relativ zum umgebenden Äther stattfinden, worauf wir noch besonders

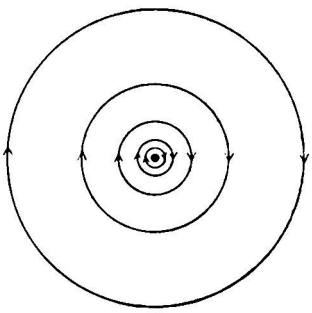


Abb. 22. Gradliniger Strom.

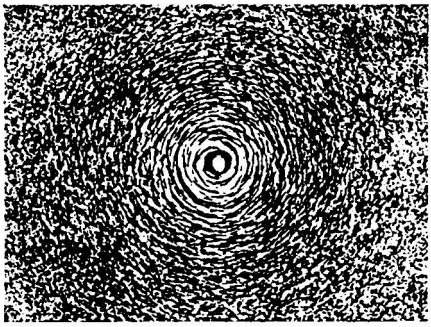


Abb. 23. Magnetische Kraftlinien eines gradlinigen Stromes.

eingehen werden (298). Daß es für die magnetischen Wirkungen gleichgültig ist, ob die Elektrizität in einem ruhenden Leiter als Strom sich bewegt oder ob sie an einem geladenen Körper sitzend mit diesem bewegt ist, dies haben besondere Versuche gezeigt, auf die wir ebenfalls noch zurückkommen (297).

Die magnetischen Wirkungen der elektrischen Ströme haben das Besondere, daß sie *in der Umgebung des Leiters* sich zeigen, während die chemischen Wirkungen sowie die Wärmewirkungen nur innerhalb der Strombahn auftreten.

Mit Oersteds Entdeckung ist nachgewiesen, daß *bewegte Elektrizität ein Magnetfeld um sich verbreitet*, und es kommt darauf an, die Kraftlinien dieses Feldes näher zu untersuchen.

277. *Magnetfeld eines geradlinigen Stromes.* — Die ziemlich schnelle Abnahme der magnetischen Kräfte mit zunehmender Entfernung vom Stromleiter gestattet die Untersuchung einzelner Teile der Gesamtstrombahn, indem man diese Teile der Magnetnadel nahe bringt und den Rest der Leitung, auch die Stromquelle enthaltend, abbiegt. Alles Wesentliche zeigt sich an *linearen Stromleitern*, die durch beliebig dünn zu nehmende Drähte zu verwirklichen sind.

Da der geradlinige Strom, welcher schon im Entdeckungsversuch die Hauptrolle spielte, die Magnetnadel überall quer zu sich stellt und da diese Nadel Kraftlinienzeiger ist (238), müssen die Kraftlinien des geradlinigen Stroms überall als *Kreise um ihn herumlaufen mit dem Mittelpunkt im Stromleiter*, wie es Abb. 22 darstellt. Dies zeigt sich auch mit Eisenfeile auf einer senkrecht zum vertikalen Stromleiter gestellten, mit einem Loche zum Durchlassen des Leiters versehenen Papierebene (Abb. 23).

Wieder haben wir hier, wie schon bei den Stahlmagneten (255), in sich geschlossene Linien als Magnetkraftlinien, und zwar haben sie hier die einfachste Form des Kreises.

Man kann auch sagen: Der magnetische Fluß, der das Bild der Magnetkraftlinien gibt (256), ist beim elektrischen Strom ein Kreisen um den Strom als Achse.

Nach den Eigenschaften der Kraftlinien (83, 248) drängen dieselben einander, und dies verhindert ihr sonst durch ihren Zug gegebenes Zusammenschrumpfen in den Leiter hinein. Das Drängen ist um so wirksamer, auf je längeren Strecken die gleichgerichteten Kraftlinien nebeneinander herlaufen (83, 237); daher müssen die größeren Kreise weiter auseinander sein als die kleineren, wie es die Abbildung 22 zeigt. Die nächste äußere Kraftlinie fällt schon ganz außerhalb des Rahmens der Zeichnung. Da die Längen des Nebeneinanderlaufens, nämlich die Längen der Kreisumfänge, proportional den Radien sind, ist zu erwarten, daß die Dichte der Kraftlinien und damit auch die Größe der Kraft verkehrt proportional dem Abstand vom Stromleiter sein wird.

Ein solches Abstandsgesetz ist bei einer Wirkung, die von einer geraden Linie, somit nur nach zwei Richtungen seitlich in den Raum sich ausbreitet — nicht nach allen drei Richtungen, wie die von Punkten ausgehenden Wirkungen — auch zu erwarten. Wirkungen, die von Punkten allseitig sich verbreiten, nehmen nach dem Abstandsquadrat ab; von geraden Linien ausgehende Wirkungen aber nur nach der ersten Potenz des Abstandes[1]). Gravitationskräfte, Kräfte nach Coulombs Gesetzen, Leuchtstärken, Schallstärken und nun auch die Stromkräfte sind Beispiele für beide Fälle, und man sieht aus der Allgemeingültigkeit in so sehr verschiedenen Fällen, daß hier nur allgemeine Raumeigenschaften das Wesentliche sind. Was die geradlinigen Ströme anlangt, ist aber, wie wir sahen, das gleiche Abstandsgesetz auch aus den Kraftlinieneigenschaften zu entnehmen.

Eine Prüfung des Zutreffens dieses Abstandsgesetzes kann sehr einfach in folgender Weise ausgeführt werden. Der Leiter A B (Abb. 24), welcher durch die Klemmschrauben a und b mit Strom versehen werden kann, ist umgeben von Magneten N S, die frei um den Stromleiter als Achse beweglich an Fäden aufgehängt sind; die Zahl der Magnete und ihre Anordnung auf der Holzunterlage ist gleichgültig[2]). Es wirkt dann auf jeden Pol eine Kraft, die ein Drehmoment um den Stromleiter als Achse ergibt. Ist das Abstandsgesetz richtig, so sind die Drehmomente auf Nord- und Südpol jedes Magneten einander entgegengesetzt gleich, weil dann Kräfte und Hebelarme, welche die Abstände der Pole vom Stromleiter sind, einander verkehrt proportional sind (s. M 97). Dies, nämlich das Nichteintreten von Bewegung der aufgehängten Magnete, ist bei Stromschluß auch tatsächlich zu beobachten, während die seitlich aufgestellte, um eine andere Achse drehbare Magnetnadel M zum Zeichen vorhandenen Stromes starken Ausschlag zeigt.

Man kann den Erfolg dieses Versuches, oder auch das Abstandsgesetz, auch

[1]) Von einer unendlichen Ebene, also nur nach einer Raumrichtung sich ausbreitende Wirkungen nehmen nach der nullten Potenz des Abstandes, d. h. überhaupt nicht ab.

[2]) Doch ist die in der Abbildung dargestellte Anordnung besonders beweiskräftig für das Abstandsgesetz.

dahin aussprechen, daß der Strom in seiner ganzen Umgebung ein einheitliches, auf alle Einheitspole der Größe nach gleiches Drehmoment um ihn selbst als Achse ausübt.

Sind nur Pole eines Zeichens in der Umgebung des Stromes vorhanden, so muß das Drehmoment auch entsprechende Drehung hervorbringen. Dies zeigt sich an der in Abb. 25 dargestellten Vorrichtung, bei welcher die stromführende Säule s der wirksame Teil ist. Der Strom kann in dieselbe unten eintreten, geht aber nur bis zur halben Höhe der am Faden drehbar aufgehängten Magnete, um dann durch den Quecksilbernapf am oberen Ende der Säule in den radialen Arm a und durch diesen in die kreisförmige Quecksilberrinne und so zurück zur

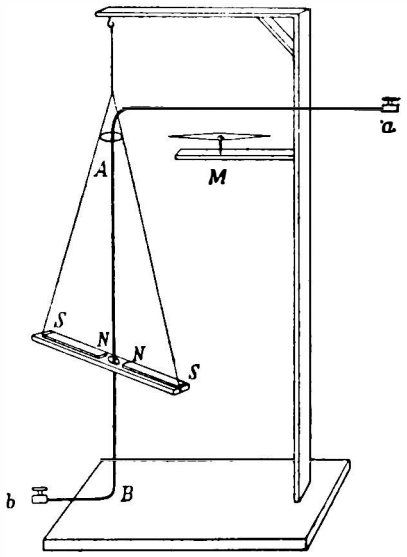


Abb. 24. Abstandsgesetz-Versuch.

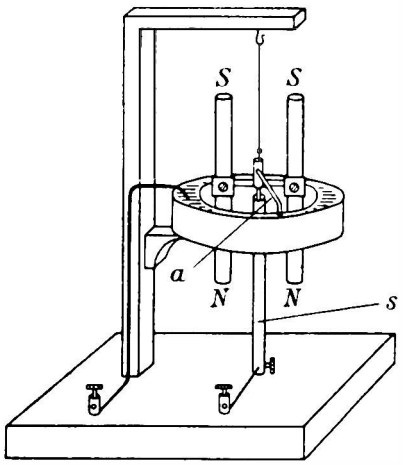


Abb. 25. Magnetpole um einen Stromleiter kreisend.

Stromquelle zu gelangen. Der Arm a ist mit den Magneten drehbar, um deren Drehung nicht zu hindern. Man sieht, daß hier die oberen Pole S in der Hauptsache der Stromwirkung entzogen sind; so wirkt der Strom in der Säule auf die unteren Pole N, und die Folge ist dauernde Drehung der aufgehängten Magnete, soweit nur die Verdrillung des Aufhängefadens es gestattet. Wendet man den Strom, so kehrt sich auch die Drehrichtung um, wie es der Handregel entspricht. Man sieht hier die Pole N tatsächlich den kreisförmigen Kraftlinien des Stromes andauernd folgen, wie es deren Zug entspricht.

278. Magnetfelder beliebig geformter Ströme. — Jeder dauernd fließende Strom muß in sich zurückkehren, einen mehr oder weniger verzerrten Kreis bildend, und da in der Nähe jedes Teiles dieses Stromes die Magnetkraftlinien um den Leiter herumgehen, wie es der geradlinige Strom zeigte, so ist zu erwarten, daß sämtliche Magnetkraftlinien des ganzen Stromes den Leiter umschlingen werden, jede in sich geschlossen und ebenfalls — je nach der Gestalt des Stromes — einen mehr oder weniger verzerrten Kreis bildend.

Der Stromkreis und jede ſeiner magnetiſchen Kraftlinien umſchlingen einander demnach wie zwei Nachbarglieder einer Kette. Abb. 26 ſtellt dies ſchematiſch dar; jeder der beiden Kreiſe, deren Ebenen ſenkrecht zu einander ſtehen, könnte Strombahn oder auch Magnetkraftlinie ſein; iſt der eine Strom, ſo iſt der andere — ungefähr — eine der ihm zugehörenden Kraftlinien. Der Strom umſchlingt ſo in jedem Falle ſeine ſämtlichen Magnetkraftlinien; dieſelben werden daher in der Fläche des Stromkreiſes am dichteſten beiſammen ſein müſſen, und daher müſſen dort auch die ſtärkſten Teile des Magnetkraftfeldes des Stromes ſich finden (244). Hierdurch hat man bereits ein die Hauptſachen umfaſſendes Bild vom Magnetfeld irgendeines gegebenen, beliebig geformten, in ſich geſchloſſenen Stromes. Die Eigenſchaften der Kraftlinien, ihr Zug und ihr Drängen (248), helfen in jedem beſonderen Falle auch Einzelheiten im Kraftlinienbilde anzugeben. Wir betrachten alsbald eingehend mehrere wichtige Fälle von Stromkraftfeldern (282—287).

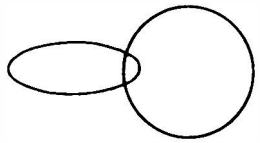


Abb. 26. Strombahn und Kraftlinie, wie die Glieder einer Kette einander umſchlingend.

279. Stromelementen-Geſetz. — Schon bevor die Kenntnis von den Kraftlinien gewonnen war, unmittelbar nach Oerſteds Entdeckung, hatte man geſucht, mit den Magnetkräften von Strömen beliebiger Form rechnen zu können. Man hat dazu die Vorſtellung einer Zerteilung des Stromleiters in kurze Stücke — „Stromelemente" — eingeführt, deren jedes unabhängig von dem anderen wirken ſoll, ſo daß die Geſamtkraft eines Stromes auf einen gegebenen Magnetpol als Summe der Kräfte ſeiner einzelnen Elemente berechnet werden kann. Es war dann nur die Frage, welches Geſetz für die Wirkung des einzelnen Stromelements auf einen gegebenen Pol anzunehmen ſei. Da man Stromelemente nicht verwirklichen kann, weil der Strom aufhört zu fließen, wenn man ihn zerteilt, mußte die Frage aus Beobachtungen an ganzen Strömen verſchiedener Formen gelöſt werden. Es zeigte ſich, daß man zu richtiger Darſtellung der Kräfte beliebig geformter Ströme kommt, wenn man jedes Stromelement nach folgendem Geſetz wirkend annimmt (Biot, Savart, Ampère, Laplace, 1820 und 1821):

$$F = J \frac{\lambda}{r^2} \sin\alpha \,. \qquad 279)$$

Dies iſt das „Stromelementen-Geſetz". Abb. 27 erläutert die Bedeutung. Der gegebene Stromleiter J J wird in kleine Teile von der Länge λ zerteilt gedacht; die Größe der Kraft eines ſolchen Stromelements λ mit der Stromſtärke J auf einen in P befindlichen Einheitspol iſt F, wenn r der Abſtand des Elementes vom Pol und α der Winkel iſt, welchen die Richtung des Elementes mit r bildet. Die Richtung der Kraft F ſteht ſtets ſenkrecht auf der Ebene des Winkels α und iſt im übrigen durch die Handregel gegeben. Da die Kraft F auf den Einheitspol bezogen iſt,

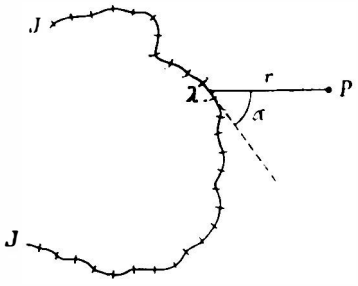


Abb. 27. Stromelementen-Geſetz.

ist sie auch der Beitrag zur Magnetfeldstärke (237) in P, welchen das Stromelement λ liefert. Die Beiträge der verschiedenen Elemente sind mit Größe und Richtung nach dem Parallelogrammsatz („geometrisch", wie stets Kräfte, M 45, 77) zu addieren, um die Magnetfeldstärke des ganzen Stromes im Punkte P zu erhalten.

280. Inhalt und Prüfung des Gesetzes. — Die im Gesetz enthaltene Proportionalität von F mit der Stromstärke J ist gleichbedeutend mit der Grundannahme, von der sofort alle Strommessung mittels magnetischer Wirkungen ausging (155). Die Nachweise dafür, daß diese Proportionalität in Übereinstimmung ist mit der Begriffsbestimmung der Stromstärke (148, 151), wurden bereits zusammengestellt (214); den unmittelbarsten Nachweis liefern die alsbald zu besprechenden besonderen Versuche (299).

Die Länge λ der Stromelemente ist willkürlich; dieselben müssen nur, wie es das Gesetz selber bedingt, so klein sein, daß für das einzelne Stromelement einheitliche Werte von r und α gelten, im allgemeinen also unendlich klein. Es steht aber demnach frei, beliebig viele Stromelemente, die gemeinsame Werte von r und α haben, in eines zusammenzufassen.

Die verkehrte Proportionalität von F mit r^2, wie bei Wirkungen, die von Punkten ausgehen (vgl. 277) ist in Übereinstimmung mit der angenommenen Punktförmigkeit der Stromelemente.

Die Abhängigkeit von $\sin\alpha$ ist eine besondere, sogleich zu erwähnender Erfahrung an ganzen Strömen entnommene Annahme, die besagt, daß dem Stromelement in seiner eigenen Richtung keine Wirkung, in seiner Querebene aber die stärkste Wirkung zuzuschreiben sei.

Die Prüfung des Stromelementengesetzes auf Brauchbarkeit erfolgte besonders in drei Fällen:

1. am geradlinigen Strom, den wir bereits betrachteten. Es ergibt sich aus der Summierung (Integration) der Elementwirkung über einen unendlich langen geradlinigen Leiter in der Tat verkehrte Proportionalität des Feldes mit der ersten Potenz des Abstandes vom Leiter, wie es der Wirklichkeit entspricht. Das vollständige Ergebnis der Summierung ist $2\,J/R$ für das Magnetfeld im Abstande R vom unendlich langen geradlinigen Strom J.

2. Für den Faktor $\sin\alpha$ erfolgte besondere Prüfung mittels zickzackförmiger Leiter, die nach dem Gesetz in nicht zu geringen Abständen gleich geradlinigen Leitern wirken sollen und die dies auch tatsächlich tun.

3. Die genaueste Prüfung war für den wichtigen Fall kreisförmiger Ströme möglich, auf welchen wir noch besonders eingehen (285—288).

281. Auf Richtigkeit seiner Grundaussage ist das Gesetz überhaupt nicht prüfbar, weil Stromelemente nicht herstellbar sind. Es ist ein unerlaubter Gedankenversuch, einen dauernd fließenden Strom in Elemente zu zerstückeln, weil der Vorgang in keiner Annäherung verwirklicht werden kann. Dementsprechend kann die in der angegebenen Weise nachgewiesene Brauchbarkeit des Gesetzes doch nur mit enger Gültigkeitsgrenze verbunden sein. Es zeigte sich bei fortgesetzter Anwendung des Gesetzes, daß es bei dauernd gleichmäßig fließenden Strömen stets zu richtigen Ergebnissen führt, daß es dagegen gerade in den Fällen, für welche es unmittelbar geeignet scheinen könnte, nämlich für Leiterstücke, die keinem geschlossenen Stromkreis angehören, sondern freie Enden

haben, in denen infolgedessen nur kurzdauernde oder hin und hergehende Elektrizitätsbewegungen eintreten können, versagt. Nur in dichter Nähe bei der Strombahn selber bleibt es immer gültig. Das Versagen bei veränderlichen Strömen betrifft also die „Fernwirkungen"; es ist dies dasselbe Versagen wie bei Coulombs Gesetz (422). Noch mehr tritt das Versagen des Denkens mit Stromelementen und Fernkräften im Falle der Wirkungen von Strömen auf Ströme hervor (322), was alles später noch zu bemerken sein wird.

Die Kraftlinien dagegen bleiben auch für diese und noch weitere Fälle gute Führer zum Verstehen der Vorgänge. Kennt man den Lauf der magnetischen Kraftlinien, so kann man aus ihren Eigenschaften alles entnehmen, was magnetische Wirkung von Strömen betrifft. Es wird dies an vielen Beispielsfällen fortlaufend ersichtlich werden, und man hat in Zweifelsfällen über eintretende oder nicht eintretende Erscheinungen, oder um überhaupt möglichst vollständige Auskünfte zu erhalten, immer wieder auf die Wirklichkeitsabbildungen, die Kraftlinien, zurückzukommen.

Das Stromelementengesetz ist dabei wertvoll als Mittel zur Berechnung der Kraftgröße und Richtung und damit auch der genauen Form der Kraftlinien in den Fällen dauernd gleichbleibender Ströme. In dieser Weise betrachten wir im folgenden die Magnetfelder einiger Sonderfälle von Stromläufen.

282. Zwei parallele, gleichgerichtete Ströme von gleicher Stärke. — Die Formung der Magnetkraftlinien gleich Strömungslinien (256) läßt schon

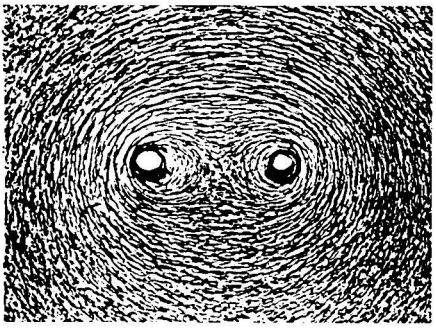


Abb. 28. Magnetische Kraftlinien zweier gleichgerichteter Ströme.

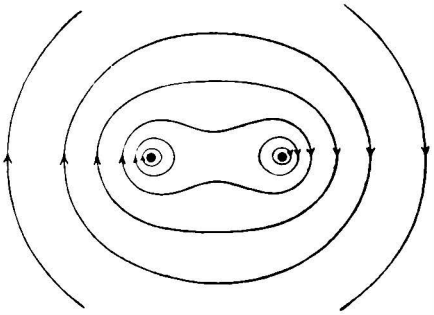


Abb. 29. Zwei gleichgerichtete Ströme.

das Kraftlinienbild erwarten, das die Eisenfeile für diesen Fall zeigt (Abb. 28, 29). Jeder der beiden Ströme würde für sich allein das einfache Kreisen um seine Achse bieten (277, Abb. 22, 23); zusammenwirkend ergibt sich in den größeren Abständen ein gemeinsames Kreisen um beide Ströme, da sie und also auch ihre Kreise gleiche Richtung haben. In großer Nähe eines jeden der Ströme ist Einzelkreisen zu bemerken, fast als wäre der andere Strom nicht vorhanden. Mitten zwischen beiden Strömen wirken dieselben bei ihrer gleichen Stärke einander entgegengesetzt gleich; dort fehlt dementsprechend das Kreisen, d. h. es fehlen dort die Kraftlinien und die Kraft ist damit dort Null.

Alles dies ergibt in gleicher Weise auch das Stromelementengesetz mit der Handregel schon durch einfache Überlegung ohne Rechnung.

Die in den Abbildungen ersichtlichen Einbuchtungen der Kraftlinien in der Nähe der Nullstelle der Kraft folgen aus dem gegenseitigen Drängen der Kraftlinien.

Man sieht, daß unter den bekannten geometrisch wohldefinierten Kurven am einfachsten die Lemniskaten für den Fall dieser Kraftlinien passen könnten. Die umständliche Rechnung nach dem Stromelementgesetz ergibt in der Tat diese Linien vierten Grades für die Kraftrichtung und die in der Abb. 29 durch die Kraftliniendichte zum Ausdruck kommende Verteilung der Kraftgröße.

Man kann die Kraftlinien der beiden Ströme auch durch Zeichnung nach dem Parallelogrammsatz aus den einfachen, kreisförmigen Kraftlinien der Einzelströme mit Kenntnis des Abstandsgesetzes derselben herleiten. Es ist dies die quantitative Durchführung der Überlegung des Zusammenwirkens des Kreisens der beiden Einzelkraftfelder, und auch so ergeben sich die Lemniskatenformen der Kraftlinien. Diese Herleitung der Kraftlinien des Gesamtfeldes gleichzeitig vorhandener bekannter Einzelfelder mittels des Parallelogrammsatzes trifft ganz allgemein zu (vgl. 320), und dies beweist die im Parallelogrammsatz vorausgesetzte ungestörte Übereinanderlagerung der Kräfte (M 45) auch für den Fall der magnetischen, ebenso wie der elektrischen Kräfte (64).

283. Zwei parallele, einander entgegengerichtete Ströme von gleicher Stärke. — Hier kann keine der Kraftlinien beide Ströme umfassen, vielmehr zwingt das entgegengesetzte gleich starke Kreisen, das sie um sich verbreiten (277), alles Kreisende den Zwischenraum der zwei Leiter zu

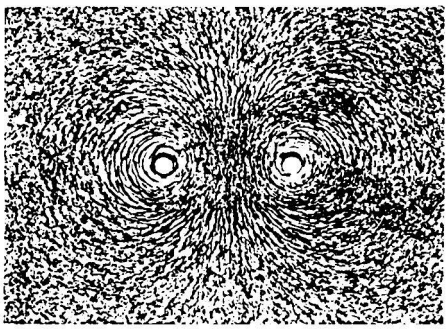


Abb. 30. Magnetische Kraftlinien zweier entgegengerichteter Ströme.

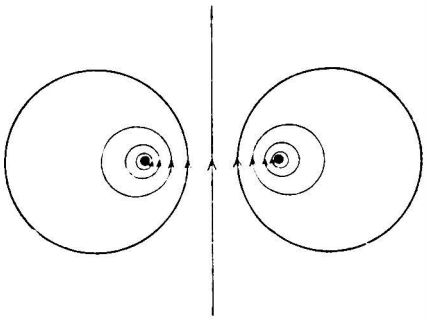


Abb. 31. Zwei entgegengerichtete Ströme.

passieren. Alle Kraftlinien dieser zwei Ströme sind in ihrem Zwischenraum zusammengefaßt. Dies ist auch schon daraus klar, daß die beiden Ströme Hin- und Rückleitung eines und desselben Stromes sein könnten und daß jeder Strom alle seine Kraftlinien umfaßt (278). Abb. 30 zeigt den so zu erwartenden Lauf, und Abb. 31 die damit übereinstimmende Darstellung nach dem Stromelementengesetz.

284. Es ist hierbei die wichtige, allgemeingültige Bemerkung zu machen, daß einem Strom von bestimmter Stärke nicht etwa eine bestimmte Anzahl von Magnetkraftlinien zugehört, weder im ganzen noch für die Längeneinheit des Leiters. Wohl hat ein Stahlmagnet eine bestimmte Kraftlinienanzahl (245), nicht aber ein Strom. Sondern die Kraftlinienzahl, die

ein Strom um sich ausbildet, hängt von der Güte des Weges ab, der für die Kraftlinien — für den magnetischen Fluß (256) des Stromes — vorhanden ist. Maßgebend für die Güte des Weges ist dessen Länge, Querschnitt und Stofferfüllung. Wir gehen hierauf später besonders ein (302); die entgegengerichteten Ströme geben aber schon ein auffallendes Beispiel davon (vgl. auch 287).

Ändert man nämlich den Abstand der beiden Ströme bei gleichbleibender Stärke derselben, so ändert sich sehr wesentlich die Gesamtzahl der Kraftlinien. Je näher die beiden Ströme einander kommen, desto enger wird der Raum zwischen den zwei Leitern, den alle Kraftlinien passieren müssen, desto weniger Kraftlinien bilden sich dementsprechend aus. Solche Abnahme der Feldstärke ergibt sich unmittelbar auch aus dem Stromelementengesetz. Denn je näher die beiden Ströme aneinanderrücken, desto genauer geben sie von jedem Paar ihrer Stromelemente zwei entgegengesetzt gleiche Summanden für die Feldstärke an jedem Punkt ihrer Umgebung, und wenn die beiden Ströme zusammenfallen — was übrigens dasselbe ist als wenn gar kein Strom da wäre —, ist die Feldstärke überall genau Null.

Dieser Fall hat auch eine nützliche Anwendung: Will man Hin- und Rückleitung eines Stromes zwischen einer zu untersuchenden Vorrichtung und der Stromquelle magnetisch wirkungslos haben, so legt man die beiden Leitungen mit Zwischenschaltung einer dünnen Isolierschicht dicht nebeneinander (Doppeldrahtleitung). Dies war beispielsweise wichtig bei der mit äußerster Feinheit durchgeführten Untersuchung des Kreisstromes (285).

285. Kreisstrom. — Das Magnetfeld des kreisförmigen Stromes ist von besonderer Wichtigkeit wegen der Möglichkeit beliebig genauer Verwirklichung unter Ausschaltung ungewünschter Mitwirkung von Zuleitungen (284) und wegen der infolgedessen auf den Kreisstrom gründbar gewesenen genauen Strommessung mittels magnetischer Wirkung (Tangentenbussole, 288). Auch die Festlegung der Stromeinheit „Weber" beruht hierauf (292). Außerdem ist das Feld des Kreisstromes charakteristisch für das Feld geschlossener Ströme überhaupt; denn jeder solche Strom ist, wie schon bemerkt (278), ein mehr oder weniger verformter Kreisstrom.

Sicher ist, wegen der Symmetrie des Kreises, daß der Kraftlinienlauf in allen Ebenen, die senkrecht zur Kreisebene durch einen Halbmesser gelegt sind, der gleiche sein muß. Es genügt daher die Kenntnis des Feldes in einer solchen Ebene, um es im ganzen Raum zu kennen. Der Kraftlinienlauf in dieser Ebene muß aber nahe gleich dem der zwei entgegengerichteten Ströme, Abb. 30, 31, sein; denn die beiden diametral entgegengesetzten Punkte des Kreises, in welchen dieser die Ebene durchsetzt, haben entgegengerichtete Ströme. In der Tat zeigt das Kraftlinienbild Abb. 32 eines Kreisstromes (dessen eine Hälfte, über dem Papier mit der Eisenfeile, von oben gesehen als schwarzer Strich erscheint) kaum einen Unterschied gegenüber Abb. 30 oder 31. Für beide Fälle gilt es, daß die Kraftliniendichte am größten, das Feld also am stärksten in der Nähe der Stromleitung sein muß, weil dort die Kraftlinien auf kleinsten Strecken nebeneinander laufen, also am wenigsten einander seitlich drängen. Im Inneren des Kreises muß aber die Dichte größer sein als gleich weit vom Leiter außerhalb, weil das

Innere von sämtlichen Kraftlinien durchsetzt wird; daher die exzentrische Lagerung der Kraftlinienkreise (Abb. 31, wovon Abb. 32 wenig verschieden ist). Auf beiden Seiten der Kreisebene muß das Feld vom Mittelpunkt aus schnell abnehmen, weil die Kraftlinien dort auseinander gehen müssen, um die geschlossenen Linien zu bilden. Der Mittelpunkt des Kreises ist danach ein Sattelpunkt oder Paßpunkt der Kraftverteilung: man kommt von ihm, in Radiusrichtung weggehend allseitig zu stärkeren Feldern, in dazu und zur Kreisebene senkrechter Richtung weggehend aber beiderseitig zu schwächeren Feldern.

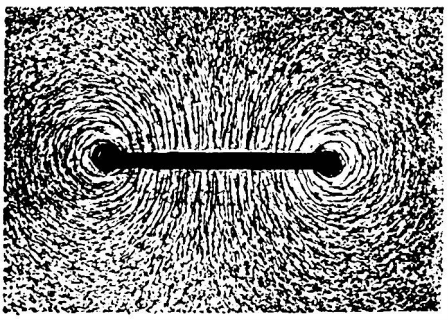


Abb. 32. Kreisstrom.

Alle diese Eigentümlichkeiten der Feldverteilung ergeben sich, wie man sieht, allein schon aus der Kenntnis der Kraftlinieneigenschaften. Das Stromelementengesetz liefert diese Feldverteilung ebenfalls. Es gibt sie, darüber hinausgehend, auch zahlenmäßig genau an, was an allen Punkten mittels Feldmessung durch eine kleine schwingende Nadel (272) nachgeprüft werden kann. Die Formen der Kraftlinien ergeben sich nach dem Stromelementengesetz auf sehr umständlichen Rechnungswegen etwas verschieden von Kreisen, während sie bei den entgegengerichteten Parallelströmen (Abb. 31) genaue Kreise sind.

286. Sehr einfach ist die Rechnung nach dem Stromelementengesetz für den Mittelpunkt des Kreises. Hier haben die Feldanteile aller Stromelemente die Richtung senkrecht zur Kreisebene (s. Abb. 33); daher ist das Gesamtfeld die einfache Summe aller dieser Anteile. Zudem ist für alle Elemente nicht nur J im Stromelementengesetz (Gl. 279), sondern auch $\alpha = 90^0$ und $r = R$ gemeinsam, so daß der ganze Kreis als ein einziges Stromelement $\lambda = 2\pi R$ genommen werden darf und somit das Feld im Mittelpunkt wird

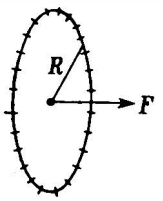


Abb. 33. Zur Kraftberechnung im Mittelpunkt eines Kreisstromes.

$$F = J(\lambda/r^2)\sin\alpha = 2\pi JR/R^2 = 2\pi J/R\,. \qquad 286)$$

Das Feld im Mittelpunkt ist danach bei gleicher Stromstärke J verkehrt proportional dem Kreisradius R. Dies ist durch viele Messungen, besonders mit den sogleich zu behandelnden Tangentenbussolen mit aller Genauigkeit bestätigt, was eine der besonderen Kontrollen des Stromelementengesetzes bildet.

287. Wenn das Feld des gleichen Stromes bei Kreisen von verschiedenem Radius R im Mittelpunkt proportional $1/R$ ist, wie gefunden, so ist es auch überall im Raum proportional $1/R$. Da aber die Fläche des Kreises, durch welche alle Kraftlinien laufen, proportional R^2 ist, so ist die gesamte Kraftlinienzahl eines Kreisstromes — sein magnetischer Fluß (256) — proportional $(1/R)R^2 = R$. Ein großer Kreis hat also bei gleichem Strom mehr Kraftlinien als ein kleiner. Dies ist wieder, wie schon bei den entgegengerichteten Parallelströmen bemerkt (284), eine Anzeige davon, daß die Zahl der Kraftlinien eines Stromes zwar proportional der Stromstärke, aber außerdem abhängig von dem den Kraftlinien zur Verfügung stehenden Raume ist. Beim Querschnitt Null für den Kraftlinienlauf wird auch die Zahl der Kraftlinien Null. So beim Kreis mit $R = 0$, wie bei den parallelen Drähten mit dem Abstand Null.

Magnetische Strommessung.

288. Tangentenbussole. — Die möglichst einwandfreie Verwirklichung des Kreisstromes, zugleich mit Einrichtung zur Messung des Feldes, ist die Tangentenbussole (Abb. 54). Der Kreis besteht aus einem Kupferstreifen; die Zuleitungen liegen möglichst dicht aneinander (284); im Mittelpunkt befindet sich eine Magnetnadel zur Feldmessung. Wird die Kreisebene in den magnetischen Meridian gestellt, so wirkt die Horizontalkomponente H des Erdfeldes stets in der Kreisebene, während das Feld F des Stromes stets senkrecht dazu gerichtet ist. Die Nadel stellt sich dann in die Resultierende der beiden Felder. Sie wird somit bei Stromschluß um einen Winkel α abgelenkt, für welchen gilt (Gl. 286) $\operatorname{tg}\alpha = F/H = 2\pi J/RH$.

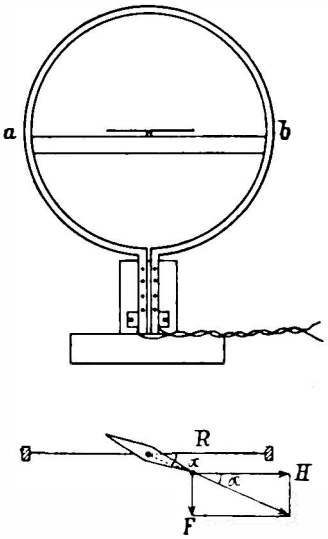


Abb. 34. Tangentenbussole in Seitenansicht und im Schnitt nach a b von oben.

Dieser Zusammenhang ist Grundlage aller Strommessung mittels magnetischer Wirkung geworden und damit — weil die Messung von Strömen seit Einführung des Strombegriffes (148) immer in erster Linie auf magnetische Wirkung sich gründete — aller Strommessung überhaupt. Man hat, nach dem Zusammenhang, für die Stromstärke

$$J = (RH/2\pi) \cdot \operatorname{tg}\alpha \,. \qquad 288)$$

Will man nur Vergleichungen von Stromstärken — Relativmessungen — ausführen, so kann man, solange die Horizontalkomponente H oder überhaupt die magnetische Kraft am Orte der Aufstellung der Bussole als unverändert gelten darf, die Stromstärke proportional der Tangente des abgelesenen Ablenkungswinkels α setzen. Daher der Name „Tangentenbussole".

Allerdings muß die Nadel der Bussole genügend klein sein, damit sie weder unabgelenkt noch stark abgelenkt in Feldteile kommt, die wesentlich stärker bzw. schwächer sind als das in der Rechnung angenommene Feld der Mitte (vgl. 285 und Abb. 31, 32); sonst gibt es Korrektionen (die nichts Neues bieten). Spiegelablesung kann die Winkelmessung immer verfeinern.

289. Absolute elektromagnetische Einheit der Stromstärke. — Auch für die Verwirklichung der heute gebräuchlichen Stromeinheit war die Tangentenbussole wesentlich (Wilhelm Weber 1835[1])). Diese Einheit ist vom Stromelementengesetz (Gl. 279) genommen.

Die erläuterten Prüfungen des Gesetzes (280) beziehen sich auf die in dessen Gleichung 279 zusammengefaßten Proportionalitäten, welche den Sinn des Gesetzes ausmachen; ob außerdem noch ein konstanter Zahlenfaktor (Proportionalitätsfaktor) zur Gleichung hinzuzufügen ist, dies hängt von der Wahl der Einheiten der vorkommenden Größen — Magnetfelder, Stromstärken, Längen —

[1]) Vgl. Anhang E I, Bd. III.

ab. Sind die Einheiten bereits festgesetzt, so folgt daraus mittels der Gleichung eine bestimmte Zahl für den Faktor, zu deren Ermittelung die Kenntnis zusammengehöriger Werte der Größen für einen einzigen Fall genügt. Ist dagegen die Wahl einer der Einheiten noch frei, so kann diese Wahl so getroffen werden, daß der Faktor 1 wird, also wegbleibt, was die Ausschaltung einer nur der willkürlichen Einheitswahl entsprungenen Zutat zum Gesetz bedeutet. Dies ist ganz allgemein der Weg, auf welchem mittels Naturgesetzen abgeleitete Einheiten gewonnen werden, im Gegensatz zu willkürlich festgesetzten Einheiten, was wir übrigens auch schon bei den abgeleiteten Einheiten der Mechanik bemerkten (M 12).

Im vorliegenden Falle sind die Einheiten für Magnetfelder (265) und für Längen bereits gegeben, und es wird die Einheit der Stromstärken abgeleitet. Man sieht, daß die Gl. 279, das Stromelementengesetz, zahlenmäßig ohne Hinzufügung eines Faktors erfüllt ist, wenn die Stärke Eins derjenige Strom hat, von dem die Längeneinheit im senkrechten Abstand Eins die Feldeinheit hervorbringt. Denn in diesem Falle werden alle Zahlenwerte in der Gleichung 1 und diese selbst wird $1 = 1$ und also erfüllt. Da aber die in die Gleichung zu setzenden Größen von Magnetfeldern, Längen, wie auch Strömen Produkte aus Zahl und Einheit sind, wie alles Meßbare (vgl. M 11), so gibt das Stromelementengesetz auch einen Zusammenhang zwischen den Einheiten. Es ist im absoluten elektromagnetischen CGS-System die Feldeinheit das Gauß und die Längeneinheit das cm, somit $F = 1$ Gauß, $\lambda = 1$ cm, $r = 1$ cm, $\alpha = 90^0$ zu setzen[1]), was $J = 1$ cm · Gauß ergibt. Man hat hiermit cm · Gauß als Stromeinheit, eine abgeleitete Einheit aus der Längeneinheit und der Feldeinheit. Abb. 17 (263) bringt dies durch die Verbindungslinien zum Ausdruck.

290. Absolute Strommessung. — Mit der Tangentenbussole können Ströme in dieser Einheit unmittelbar gemessen werden, da die zugehörige Gl. 288 nur Anwendung des Stromelementengesetzes ist, aus welchem die Einheit stammt. Es ist dazu nächst Ermittelung des Ablenkungswinkels α nur die Kenntnis der Horizontalkomponente H am Aufstellungsorte der Bussole (267) und die Ausmessung des Radius R des Bussolenkreises erforderlich[2]). Ist $RH/2\pi$ hiernach bekannt, so können — solange H unverändert bleibt — mit Hilfe dieses Faktors, durch Multiplikation desselben mit der Tangente des Ablenkungswinkels, stets sehr einfach absolute Strommessungen mittels der Bussole ausgeführt werden. Man nennt diesen in Gl. 288 eingeklammerten Faktor den „Reduktionsfaktor" der Tangentenbussole. Er ergibt sich mit R in cm und H in Gauß in cm · Gauß, womit man auch den Strom J richtig in cm · Gauß erhält, da π und $\operatorname{tg}\alpha$ bloße Zahlen sind[3]).

291. Dimensionen. — Ebenso wie wir die absolute Stromeinheit auf cm und Gauß zurückführten, ist auch das Gauß auf Pol- und Krafteinheit zurückführbar und diese beiden Einheiten weiter auf die in Abb. 17 vorangehenden Einheiten, wie es bereits Erläutertem entspricht, bis man auf die drei Grundeinheiten cm, gr, sek kommt. Tab. 50 gibt eine Zusammenstellung der

[1]) Sinus und die anderen trigonometrischen Funktionen (auch π) sind bloße Zahlen; sie sind Verhältniszahlen von Längen, aus welchen die Längeneinheit herausgefallen ist, so daß sie für jede Wahl der Längeneinheit gleichmäßig gelten.

[2]) Ist der Leiterquerschnitt des Kreises nicht sehr klein, so muß für R die Stromverzweigung im Querschnitt berücksichtigt werden.

[3]) Vgl. zweitvorige Fußnote.

Ergebniſſe ſolcher Zurückführungen der verſchiedenen abgeleiteten Einheiten auf die drei Grundeinheiten, wobei auch die ſpäter noch abzuleitenden Einheiten ſchon mit aufgenommen ſind. Man ſieht dort z. B., wie die Krafteinheit, das dyn als Produkt aus Maſſe (gr) und Beſchleunigung ($cm\ sek^{-2}$) ſich darſtellt, wie es nach dem Grundgeſetz der Dynamik, woher dieſe Einheit genommen iſt, ſein muß (263); auch die Zuſammenſetzung der Feldeinheit, des Gauß, aus cm, gr und sek iſt erſichtlich.

Man nennt die Zuſammenſetzung der Einheit einer Größe aus den drei Grundeinheiten die „Dimenſion" der betreffenden Größe. Es hat z. B. der Widerſtand im elektromagnetiſchen Syſtem die Dimenſion einer Geſchwindigkeit ($cm\ sek^{-1}$, ſ. die Tab. 50; die dort bei den Dimenſionen ſtehenden willkürlichen Zahlenfaktoren werden weiter unten erläutert, 292).

Tab. 50. Abſolute Einheiten.

Größenart	Einheit (Dimenſion)	Syſtem
Länge	cm	CGS
Maſſe	gr	
Zeit	sek	
Geſchwindigkeit .	$cm\ sek^{-1}$	
Beſchleunigung .	$cm\ sek^{-2}$	
Kraft	$Dyn = cm\ gr\ sek^{-2}$	
Pol	$cm^{\frac{3}{2}}\ gr^{\frac{1}{2}}\ sek^{-1}$	CGS elektromagnetiſch
Feld	$Gauß = cm^{-\frac{1}{2}}\ gr^{\frac{1}{2}}\ sek^{-1}$	
Strom	$Weber = 0{\cdot}1\ cm^{\frac{1}{2}}\ gr^{\frac{1}{2}}\ sek^{-1}$	QUS Techniſch (praktiſch) elektromagnetiſch (ſ. 292).
Elektriz. Menge .	$Coulomb = 0{\cdot}1\ cm^{\frac{1}{2}}\ gr^{\frac{1}{2}}$	
Spannung	$Volt = 10^8 cm^{\frac{3}{2}}\ gr^{\frac{1}{2}}\ sek^{-2}$	
Widerſtand . . .	$Ohm = 10^9\ cm\ \ sek^{-1}$	
Kapazität	$Farad = 10^{-9}\ cm^{-1}\ \ sek^2$	

Die Beachtung der Dimenſionen der Größen iſt bei allen Rechnungen mit gemeſſenen Größen ſehr förderlich, ja faſt unerläßlich, um falſche Ergebniſſe, die durch Verwechſlung von Einheiten entſtehen können, ſofort zu erkennen. Dies kommt beſonders beim ſtark verzweigten Syſtem der elektriſchen Einheiten ſehr in Betracht, weshalb wir den Abſchnitt über Dimenſionen an dieſer Stelle bringen.

Wird z. B. die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus aus den nach Gauß' Verfahren durchgeführten Meſſungen nach den zugehörigen Gleichungen (267—270) berechnet, und ſind alle Meßergebniſſe als Produkte aus Zahl und Einheit in die Rechnung geſetzt worden, wie es ſein muß, ſo muß im Endergebnis die dem Gauß entſprechende Verbindung der drei Grundeinheiten auftreten, das Ergebnis muß die Dimenſion eines Magnetfeldes im benutzten Einheitsſyſtem haben, ſonſt wäre es falſch. Gleichungen, in welchen Summanden verſchiedener Dimenſion nebeneinander ſtehen, müſſen falſch ſein; man kann nicht ſinnvoll zu einer Zeit eine Länge addieren, wohl aber etwa den Quotienten einer Länge und einer Geſchwindigkeit, weil dieſer die Dimenſion einer Zeit hat. Damit übereinſtimmend iſt die Forderung, daß nach Einſetzen von Zahlenwerten ſamt den Einheiten für alle Größen in eine richtige Gleichung ſämtliche Einheiten wegkürzbar ſein müſſen, ſonſt hätte die Gleichung keinen von der willkürlichen Wahl der Einheiten unabhängigen Sinn. Dies fordert z. B. auch, daß Exponenten ſtets bloße Zahlen ſein, d. h. die Dimenſion Eins ($cm^0 gr^0 sek^0$) haben müſſen, was übrigens auch deren Bedeutung entſpricht, und ähnliches mehr.

Wenn Größen verſchiedener Art die gleiche Dimenſion haben, ſo iſt das immer bedeutungsvoll; jedoch geht die Bedeutung nicht ſo weit, daß etwa dieſe Größen in irgendwie verborgener Weiſe auch von gleicher Art wären. Es kann dies am Beiſpiel der Kapazität erläutert werden.

Dieselbe hat im elektromagnetischen System die Dimension einer reziproken Beschleunigung ($cm^{-1}\,sek^2$, s. Tab. 50); sie kann aber schon deshalb nichts derart sein, weil diese Dimension ihr — wie auch den anderen elektrischen Größen ihre Dimensionen — nur im willkürlich gewählten elektromagnetischen System zukommt. Im elektrostatischen System ist die Kapazität von der Dimension einer Länge (cm), ohne aber auch eine Länge zu sein. Wohl aber hat jede Kapazität wesentlich mit einer Länge zu tun; eine Kapazität von beispielsweise 5 cm ist verwirklicht in einer freistehenden Kugel von 5 cm Radius (vgl. 50). Die Dimension cm zeigt von vornherein schon an, daß eine Kapazität immer mit dem Längenmaß allein, ohne Zuhilfenahme von Massensatz (gr) und Uhr (sek) ausmeßbar sein muß, zunächst in elektrostatischem Maß, dann aber — wegen des gesichert bekannten Umrechnungsfaktors (50, 300) — auch in elektromagnetischen Einheiten (CGS oder Farad).

Wertvoll ist die Betrachtung der Dimensionen auch gelegentlich als Mittel zum Vordringen ins Unbekannte, wo andere Wege zunächst versagen (vgl. 300).

292. Technische oder praktische Stromeinheit. QUS-Einheiten. — Die CGS-Einheiten der elektrischen Größen sind für den technischen Gebrauch nicht unmittelbar geeignet, weil teils zu klein, teils zu groß. Daher wurden sie mit bestimmten Zehnerpotenzen als Faktoren versehen, wie es Tab. 50 angibt. Diese so auf passende Größe gebrachten Einheiten erhielten die besonderen, von uns

Tab. 51. **Stromeinheit**

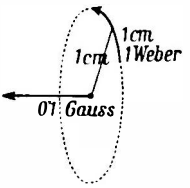
1 Ampère = 1 Weber

= 0·1 Gauß-Weber'sche CGS-Einheit

Verwirklichung mittels der Tangentenbussole (Wilh. Weber)

nach der Definition:

Stromstück v. 1 cm Länge
erzeugt in 1 cm Abstand
das Magnetfeld 0·1 Gauß



Praktische Festhaltung: 1 Weber scheidet ab:
10·44 cm^3 Knallgas in 1 min oder
1·118 mgr Silber in 1 sek (Kohlrausch).

Zusammenhang mit den anderen absoluten Einheiten:

(Ohms Gesetz) $\quad 1\ \text{Web.} = \dfrac{1\ \text{Volt}}{1\ \text{Ohm}}$ $\quad$ (Definition d. Ohm)

(Verbindung v. Statik u. Dynamik) $\quad 1\ \text{Web.} = \dfrac{1\ \text{Coulomb}}{1\ \text{Sek}}$ $\quad$ (Def. d. Coulomb)

Historisches:

1831: Begründung des absoluten Einheitssystems durch Gauß in Göttingen.
1835: Begründung der Strommessung in absoluten Einheiten durch Weber in Göttingen.
1881: Erste Ermittelung des heute noch gültigen Silberabscheidungswertes zur praktischen Festhaltung der absoluten Stromeinheit durch Kohlrausch in Würzburg.
1884: Festlegung der praktischen absoluten Einheiten in Paris, die Stromeinheit erhält den Faktor 0·1 und den Namen Ampère.
1916: Vielleicht darf man 1 Ampère zu deutsch 1 Weber nennen.

schon von vornherein in Benutzung genommenen, ebenfalls in Tab. 50 verzeichneten Namen.

Bei der Stromeinheit, dem Weber oder Ampère (151), ist der Faktor 0·1. Es ist demnach 1 Weber = 1 Ampère = 0·1 CGS elektromagnetisch = 0·1 $cm^{\frac{1}{2}}$ $gr^{\frac{1}{2}}$ sek^{-1}. Tab. 51 gibt dazu auch einige historische Daten.[1])

Sämtliche zu den technischen Einheiten gewählten Faktoren ergeben sich, wenn statt cm, gr und sek (CGS) die drei anderen Grundeinheiten: Erdquadrant ($Q = 10^9$ cm), Undezimogramm ($U = 10^{-11}$ gr) und Sekunde (S) genommen werden, womit man das „QUS"-System erhält. Man kann daher auch einfach sagen, die technischen elektrischen Einheiten sind elektromagnetische QUS-Einheiten. Führt man diese Bezeichnung ein, so werden alle willkürlichen Sondernamen überflüssig. Der „Strom 1 QUS" bedeutet damit 1 Ampère oder 1 Weber, die „Spannung 1 QUS" ist 1 Volt usw.[2]).

293. Festhaltung der Stromeinheit. — Eine Strommessung in CGS- oder QUS-Einheiten mit der Tangentenbussole (290) in einwandfreier und möglichst genauer Durchführung ist keine kleine Aufgabe. Die Schwierigkeit liegt großenteils in der nötigen, entsprechend genauen Ermittelung der Horizontalkomponente des Erdmagnetismus am Orte der Aufstellung der Bussole. Man muß dazu besondere Messungen nach Gauß' Weise ausführen (267 u. f.), auch auf Veränderlichkeit der Erdkraft achten, und es ergibt sich im ganzen die Arbeit von Monaten. Um das Ergebnis solcher Arbeiten aufbewahrbar zu machen, ist nichts geeigneter als die gleichzeitige Feststellung der chemischen Wirkung des gemessenen Stromes. Man schaltet daher in den Strom ein Voltameter ein (175) und erhält dadurch als Ergebnis die Kenntnis der Knallgas-, Kupfer- oder Silber-Abscheidung von 1 Weber in der Zeiteinheit. Damit ist die mit der Tangentenbussole nach Definition hergestellte Stromeinheit praktisch für alle Zeiten und leicht zugänglich festgehalten; denn das Arbeiten mit den Voltametern bietet keine Schwierigkeit. Hierauf beruhen die Graduierungen der käuflichen Webermesser beliebiger Einrichtung; ihre Teilungen werden stets unmittelbar oder mittelbar[3]) mit Hilfe der Voltameter hergestellt bzw. nachgeprüft.

Die ersten hierzu dienlichen Messungen mit Tangentenbussole und Voltameter wurden von Wilhelm Weber ausgeführt; stete Verfeinerungen haben zuletzt zur unzweifelhaft gesicherten Angabe von 1·118 mgr Silberabscheidung durch 1 Weber in 1 sek geführt (F. Kohlrausch 1881 und 1886[4])). Die Umrechnung für das bequemere aber weniger genaue Knallgasvoltameter erfolgt mittels Faradays vollkommen gesichertem zweiten Gesetz der Elektrolyse (188). Dies ist der Ursprung der auch in unserer Tabelle 51 eingetragenen Angaben zur Festhaltung des Weber.

294. Durch die Stromeinheit ist auch die Mengeneinheit der Elektrizität im elektromagnetischen QUS-System gegeben, das von uns immer schon

[1]) S. auch Anhang E I (Bd. III).

[2]) Diese Vereinfachung dürfte um so empfehlenswerter sein, als neuerdings immer noch mehr Spezial-Einheiten mit neuen willkürlichen Namen eingeführt werden, die das Gedächtnis übermäßig belasten.

[3]) Auf dem bequemen Umwege über Ohms Gesetz mittels Ohm und Volt (Quecksilberfaden und Normalelement, vgl. 355, 356).

[4]) Vgl. Anhang E I Bd. III.

benutzte Coulomb (15). Stromstärke und Menge sind nämlich durch die Definitionsgleichung des Stromes (148, 151), Stromstärke = Elektrizitätsmenge/Zeit, miteinander und mit der Zeiteinheit verbunden. Die Mengeneinheit ist danach die beim Strom 1 Weber in 1 sek den Leiterquerschnitt passierende Elektrizitätsmenge: 1 Coulomb = 1 Webersek = $0{\cdot}1\,\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{gr}^{\frac{1}{2}}$ (Tab. 50).

Die Mengeneinheit ist somit im elektromagnetischen System von der Stromeinheit genommen (vgl. Abb. 17). Im elektrostatischen System ist es umgekehrt (vgl. 264); dort geht alles von der Mengeneinheit aus, und aus dieser folgt, übrigens nach dem gleichen Zusammenhang mit der Zeit, die Stromeinheit. Es ist dort die Mengeneinheit ebenso aus Coulombs Gesetz abgeleitet (15), wie im elektromagnetischen System die Poleinheit (265); deshalb hat die elektrostatische Mengeneinheit auch dieselbe Dimension wie die elektromagnetische Poleinheit ($\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{gr}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sek}^{-1}$, vgl. Tab. 50).

Auf die übrigen Einheiten des elektromagnetischen Systems, das Volt, Ohm und Farad, deren Herleitung in Abb. 17 ebenfalls angedeutet ist, gehen wir nach Behandlung des dem Volt zugrunde liegenden Induktionsgesetzes ein (353).

295. Vervielfältigter Kreisstrom. — Leitet man den Strom mittels dünnen, isolierten Drahtes mehrmals in dicht gelegten Windungen im selben Kreise herum, so bleibt der Lauf der Kraftlinien dieses Bündels von Kreisströmen ganz derselbe wie beim einfachen Kreisstrom (Abb. 32 oder nahezu 31), nur ist die Zahl der Linien und damit die Stärke des Feldes nach Maßgabe der Windungszahl vervielfacht.

Es entspricht dies unmittelbar dem Stromelementengesetz (279), indem bei n Windungen des Kreises an Stelle jedes einfachen Stromelementes λ n solche mit überall im Raume gleichen Werten von r, α und J treten. Es ist dies dieselbe Ver-n-fachung des Feldes, welche auch bei ver-n-fachtem Strom im einfachen Kreis eintritt. Man sieht dabei auch ganz allgemein, bei beliebig geformtem Stromlaufe, daß Verstärkung des Stromes und Vermehrung der Leiterzahl ganz im selben Sinne und Maße für das Feld der ganzen Umgebung wirken müssen. Es ist das sogar selbstverständlich, sobald es sicher ist, daß der Strom bewegte Elektrizität ist (297), die den ganzen Leiterquerschnitt gleichmäßig erfüllt (157); denn es kann dann jederzeit der stärkere Strom in beliebig viele schwächere Stromfäden zerlegt gedacht werden ohne etwas zu ändern. Das Produkt aus Stromstärke und Windungszahl, auf welches es demnach ankommt, wird auch die „Zahl der Weberwindungen" genannt. Dieser Zahl ist die gesamte Magnetkraftlinienzahl — der magnetische Fluß (256) — des Stromes gegebener Leiterform stets proportional (vgl. 301). Ist nur eine Windung vorhanden, so trifft dies mit der einfachen Proportionalität mit der Stromstärke zusammen. Daß außerdem die Kraftlinienzahl von dem den Kraftlinien zur Verfügung stehenden Raume abhängt, wurde bereits wiederholt bemerkt (284, 287, vgl. weiter 302).

296. Multiplikatoren. — Der vervielfachte Kreisstrom erlaubt die Messung schwacher Ströme, indem man die Ablenkung einer im Mittelpunkt des Kreises befindlichen Magnetnadel beobachtet. Die genaue Kreisform, wie bei der Tangentenbussole (288), ist dabei nicht nötig, weil man Eichung in Weber besser im Nebenschluß (167) als durch Rechnung ausführen kann. Man

gewinnt Empfindlichkeit, wenn die Windungen so dicht wie möglich um die Magnetnadel gelegt werden, entsprechend dem Wachsen des Magnetfeldes eines Kreisstromes bei abnehmendem Radius (Gl. 286).

Der so gebaute „Multiplikator" entstand schon frühe, bald nach Oersteds Entdeckung; er war das erste sehr empfindliche Galvanometer (155). Man kann so bei genügend vielen Windungen feinen Drahtes und Spiegelablesung leicht Milliontel Weber messen.

Richtkraft oder „Kontrollkraft", welche die Nadel ohne Strom stets wieder zum Nullpunkt bringt und mit deren Drehmoment das des Stromes sich ins Gleichgewicht setzt, liefert dabei die erdmagnetische Horizontalkomponente.

Für gröbere Zwecke kann auch die Schwerkraft als Kontrollkraft benutzt werden, wie bei dem schon früher (155) beschriebenen Galvanometer (Abb. 98, Bd. III).

Willman die Empfindlichkeit steigern, so kann dies durch Verringerung der Kontrollkraft geschehen. Ein außen am Galvanometer anzubringender Astasiermagnet kann dazu die Horizontalkomponente am Orte der Nadel beliebig schwächen (272). Man kann aber auch die Nadel selbst „astatisch" machen, indem man eine zweite, gleiche Nadel mit verkehrten Polen an derselben Achse fest mit ihr verbindet. In Abb. 35 ist ein solches astatisches Nadelpaar am Faden F hängend sichtbar. Die Stromrolle R R darf dabei nur die eine Nadel umgeben, um nicht mit der Erdkraft auch die Stromkraft auszuschalten. Sind die magnetischen Momente der beiden Nadeln gleich, so bleibt als Kontrollkraft nur mehr die sehr gering zu machende Torsionskraft des Aufhängefadens übrig. Eine besondere Stromrolle um die zweite Nadel, entgegengesetzt durchströmt, erhöht noch weiter die Empfindlichkeit.

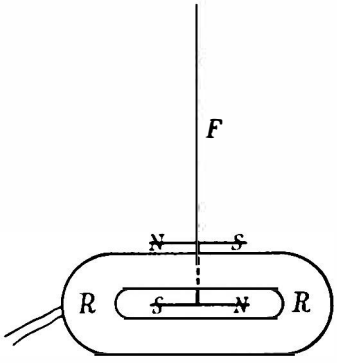


Abb. 35. Multiplikator mit astatischer Nadel.

Man kann mit empfindlichsten Galvanometern noch Ströme messen, die ein Jahrhundert lang fließen müßten, um 1 mgr Silber abzuscheiden (Größenordnung 10^{-10} Weber).

297. Mit geladenen Körpern bewegte Elektrizität und in Leitern strömende Elektrizität haben gleiche magnetische Wirkung. — Der von Ampère eingeführte Begriff des elektrischen Stromes (148) setzte an Stelle teilweise oder ganz unbekannter Vorgänge im Leiter die einfache Vorstellung bewegter positiver Elektrizität im Querschnitt des Leiters in der angenommenen Richtung des Stromes, oder auch gleichviel negativer Elektrizität in der entgegengesetzten Richtung. Wohl war die Lieferung der Elektrizitäten von den Stromquellen in den Leiter hinein durch Volta bei seinen Elementen sichergestellt; es war aber doch eine Frage, ob nicht nächst der Bewegung der beiden Elektrizitäten im Leiter auch etwa eine gegenseitige Neutralisation derselben im Leiter wesentlich sei für die beobachtbaren Wirkungen des Stromes, besonders auch für die magnetische Wirkung. Es war daher notwendig zu untersuchen, ob die Bewegung eines mit Elektrizität geladenen Leiters dieselben magnetischen Kräfte in der Umgebung der Bahn seiner Bewegung hervorbringt, wie das Fließen eines Stromes in dieser Bahn. Die Frage ist durch zahlreiche Versuche in bejahendem Sinne entschieden worden. Die Schwierigkeit lag nur darin, daß es nicht leicht ist, ebensogroße Elektrizitätsmengen samt den Leitern, auf welchen sie sitzen, in Bewegung zu erhalten, als der gewöhnlichste Strom durch einen Leiter fließen läßt.

Wohl war durch die Aufklärung der Elektrolyse schon gezeigt, daß der

Strom in Elektrolyten, der doch — wie alle anderen Ströme — auch seine magnetische Wirkung hat, wirklich in nichts anderem besteht als in der Bewegung der geladenen Ionen (186); aber der Versuch mit gewöhnlichen, bewegten, geladenen metallischen Leitern mußte noch größere Sicherheit bieten[1]). Da die auf solche Leiter zu bringenden Elektrizitätsmengen verhältnismäßig klein sind, waren sehr große Geschwindigkeiten der Leiter erforderlich um die für wahrnehmbare magnetische Wirkung nötigen Mengen in der Zeiteinheit durch den Querschnitt der Bahn zu bringen. Die besten Versuche sind mit schnell rotierenden Isolatorscheiben ausgeführt, deren Umfang mit radial aufgeschlitzter, elektrisch geladen gehaltener Metallbelegung versehen war. Es ergaben die so nach Definition des Stromes künstlich hergestellten Kreisströme Ablenkungen der Magnetnadel in ihrer Umgebung ganz von derselben Größe, wie ein längs des Umfanges der rotierenden Scheibe fließender Strom, der in gleicher Zeit dieselbe Elektrizitätsmenge durch den Bahnquerschnitt bringt; auch zeigten positive Elektrizität in der einen Richtung und negative in der entgegengesetzten Richtung bewegt die gleiche Wirkung. Damit ist außer allen Zweifel gesetzt, daß die magnetischen Wirkungen elektrischer Ströme ganz der in ihnen bewegten Elektrizität zugehören.

298. Elektrizitätsbewegung relativ zum Äther des Ortes ist maßgebend. — Alle Beobachtungen magnetischer Wirkungen bewegter Elektrizität beziehen sich auf Bewegung der Elektrizität relativ zur Erde, so besonders auch die zuletzt beschriebenen Versuche mit bewegten geladenen Körpern. Es kann aber nicht so sehr die Erde und überhaupt Materie maßgebend sein für Bewegungswirkungen von Elektrizität, als vielmehr der Äther; denn für die mit den Elektrizitäten bewegten elektrischen Kraftlinien ist Anwesenheit von Materie nebensächlich (3, 129), und die magnetischen Wirkungen zeigen sich auch eben dort, wo die Kraftlinien der bewegten Elektrizitäten sind, nämlich in der Umgebung dieser Elektrizitäten, im materiefreien Raum. Da aber der an der Erboberfläche vorhandene Äther an derselben ruhend anzunehmen ist (O 23), so stimmen alle Beobachtungsergebnisse auch mit der hier vorangestellten Behauptung, daß es auf Bewegung relativ zum Äther des Ortes ankomme, und man kann daher als Grundvorgang aller magnetischen Wirkungen bewegter Elektrizität angeben: Elektrische Kraftlinien, die im Äther ihrer Umgebung bewegt sind, erzeugen magnetische Kraftlinien. Wir werden dies in Allgemeinheit noch weiter verfolgen (328 u. f.), und es zeigt sich, daß auch für Bewegungswirkung magnetischer Kraftlinien Geschwindigkeit relativ zum Äther in Betracht kommt (405).

299. Sicherung der Proportionalität von magnetischer Kraft und Stromstärke; Messung von Elektrizitätsmengen mit dem Galvanometer. — Stromstärken nach Definition, als Mengen in der Zeiteinheit (151), unmittelbar zu messen und also die mit guten Gründen (214) angenommene Proportionalität der magnetischen Wirkung mit der Stromstärke (280) unmittelbar zu sichern, ist nicht möglich. Man kann aber aufgehäufte, meßbare Elektrizitätsmengen, wie sie geladene Kleistsche Flaschen bieten, durch Galvanometer entladen und die erfolgenden Ausschläge messen und dadurch die Sicherung erreichen. Solche Messungen wurden seit Faraday mit steigender Genauigkeit

[1]) Schon Faraday hatte (Febr. 1838) mit solchen Versuchen begonnen.

ausgeführt. Sie zeigten, daß der Galvanometerausschlag proportional ist der entladenen Elektrizitätsmenge, unabhängig von der Spannung, zu welcher die Menge aufgehäuft war, und unabhängig von der Zeitdauer der Entladung, die je nach den eingeschalteten Widerständen größer oder kleiner sein kann[1]), wenn nur die Entladung im ganzen so schnell erfolgt, daß sie zu Ende ist ehe die Galvanometernadel weit aus der Ruhelage gekommen ist.

Dieses Verhalten beweist die Proportionalität der magnetischen Kraft der Ströme mit ihrer Stärke, nämlich mit dem Verhältnis von Menge zu Zeit. Um dies einzusehen, überlege man die Entladung der gegebenen Elektrizitätsmenge einmal in gegebener kurzer Zeit[2]) und dann in der Hälfte dieser Zeit. Die Halbierung der Zeit bedeutet Verdoppelung der Stromstärke; ist aber die magnetische Kraft proportional der Stromstärke, so ist auch die Kraft auf die Nadel und damit deren Beschleunigung verdoppelt, und dies gibt bei der halben Dauer der Beschleunigung dieselbe Geschwindigkeit der Nadel, mit der sie aus ihrer Ruhelage losgelassen wird, und damit auch denselben Ausschlag wie beim einfachen Strom mit der doppelten Dauer. Die Unabhängigkeit des Ausschlages von der Dauer der Entladung bei gleichbleibender Menge ist somit gleichbedeutend mit der angenommenen Proportionalität der magnetischen Stromkraft und beweist diese.

Danach ist durch dieselbe Überlegung auch einzusehen, daß die Galvanometerausschläge bei Entladung verschiedener Elektrizitätsmengen diesen Mengen proportional sein müssen, wie es beobachtet wurde, was wieder die Proportionalität der magnetischen Stromkraft mit der Stromstärke nachweist.

Hiermit ergibt sich auch die Möglichkeit, mittels des Galvanometers Elektrizitätsmengen zu messen, wenn sie in genügend kurzer Zeit durch seine Windungen gehen. Man hat dann erste Ausschläge zu beobachten („ballistische" Anwendung des Galvanometers), wogegen es bei der gewöhnlichen Anwendung zur Messung von Stromstärken auf dauernde Ablenkungen ankommt. Hat man das Galvanometer mit dauernden Ablenkungen in Weber geeicht, so können die Elektrizitätsmengen aus ersten Ausschlägen auch in Coulomb berechnet werden[3]).

300. Verhältnis der elektrostatischen zur elektromagnetischen absoluten Elektrizitätsmengeneinheit. — Daß dieses Verhältnis eine Naturkonstante und somit von hervorragender Bedeutung sein müsse, dies war von Anfang seit Begründung des absoluten Maßsystems klar. Denn alle Einheiten dieses Systems, sowohl die elektrostatischen als die elektromagnetischen, sind nach Maßgabe von Naturgesetzen gewählt (262 u. f.). Es ist daher dieses

[1]) Versucht man Kleistsche Flaschen ohne zugeschalteten Widerstand einer feuchten Schnur oder eines Rohres mit verdünnter Säure durch ein Galvanometer zu entladen, so umgeht die Entladung die Windungen des Galvanometerdrahtes, indem deren Isolation durchschlagen wird. Der Ausschlag fällt dann dementsprechend klein aus. Die Erscheinung ist Folge der Selbstinduktion (357 u. f.) in den Galvanometerwindungen; mit der hier vorliegenden Prüfung hat sie nichts zu tun; sie muß nur verhindert werden.

[2]) Alle hier zu betrachtenden Stromdurchgänge müssen — wie schon bemerkt — von so kurzer Dauer sein, daß sie die Galvanometernadel noch so gut wie in der Ruhelage treffen; andernfalls könnte keine einfache Überlegung und Rechnung gelten.

[3]) Der Umrechnungsfaktor ergibt sich aus der im Anhang E II zu findenden Durchführung der angegebenen Überlegung in Gleichungen.

Verhältnis schon von Wilhelm Weber (mit R. Kohlrausch, 1856) in sogleich zu erläuternder Weise durch eine Reihe besonderer Messungen ermittelt worden, und es sind später solche Messungen wiederholt mit steigender Genauigkeit durchgeführt worden. Das Ergebnis ist, daß die statische CGS-Elektrizitätsmengeneinheit rund $3 \cdot 10^{10}$-mal so groß ist als die elektromagnetische. Daß die Verhältniszahl so sehr groß ist, dies entspricht der schon hervorgehobenen außerordentlichen Größe der statischen Einheit und der Kleinheit der elektromagnetischen (15).

Da die statische Einheit ihrer Definition nach (15) dieselbe Dimension (291) hat wie der Magnetpol, nämlich (Tab. 50) $\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\mathrm{gr}^{\frac{1}{2}}\mathrm{sek}^{-1}$, die elektromagnetische Einheit ihrer Herleitung nach (294) aber die Dimension $\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\mathrm{gr}^{\frac{1}{2}}$ (Tab. 50), so hat das Verhältnis der beiden Einheiten die Dimension $\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\mathrm{gr}^{\frac{1}{2}}\mathrm{sek}^{-1}/\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\mathrm{gr}^{\frac{1}{2}} = \mathrm{cm\,sek}^{-1}$, d. i. die einer Geschwindigkeit. Daraus folgt, daß das gemessene Einheitsverhältnis etwas mit einer Geschwindigkeit zu tun haben müsse und zwar, nach dem schon Bemerkten, mit einer naturgegebenen Geschwindigkeit. In Wirklichkeit war schon aus Wilhelm Webers erster Messung die Gleichheit des Verhältnisses mit der Lichtgeschwindigkeit ersichtlich geworden; es ist $3 \cdot 10^{10}$ cm/sek = 300000 km/sek die Lichtgeschwindigkeit (O 21). Später (Maxwell 1864) ist auch der Zusammenhang ersichtlich geworden, der die Gleichheit des Verhältnisses mit der Lichtgeschwindigkeit verständlich macht; das Verhältnis bedeutet nämlich nach Maxwells Gleichungen (406) die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im materiefreien Raume[1]).

Der aus allen vorhandenen Messungen gesicherte, genaue Wert des Einheitsverhältnisses ist $2{\cdot}998 \cdot 10^{10}$ cm/sek. Die ebenso gesicherte Lichtgeschwindigkeit hat die gleiche Größe (O 19, 20). Diese Übereinstimmung ist einer der besten mittelbaren Nachweise für die elektromagnetische Natur der Lichtwellen (den unmittelbaren Nachweis aus den Eigenschaften der elektrischen Wellen s. unter 430).

Die Messungen zur Ermittelung des Einheitsverhältnisses bestehen in Messung einer bestimmten Elektrizitätsmenge zuerst in elektrostatischem Maße und dann in elektromagnetischem Maße. Das Verhältnis der dabei erhaltenen beiden Zahlen ist das gesuchte Verhältnis der Einheiten. Es ist reziprok zu nehmen; denn je größer die Einheit, desto kleiner ist die Zahl.

Die zu messende, an einem Leiter etwa in Kleistschen Flaschen aufgehäufte Menge kann elektrostatisch aus Spannung und Kapazität ermittelt werden (Gl. 47). Für die elektrostatische Messung der Spannung ist das absolute Elektrometer geeignet (100); die elektrostatische Messung der Kapazität kann durch Vergleichung mit der Kapazität einer frei aufgehängten Kugel ermittelt werden, die ihrerseits durch Messung des Radius bekannt ist (50, 102). Die elektromagnetische Messung derselben Menge erfolgt mit dem durch Tangentenbussole oder Voltameter geeichten ballistischen Galvanometer (299). Man sieht, daß eine Fülle von teils umständlichen Einzelmessungen erforderlich ist, die mit den Hilfsmitteln der früheren Zeit gar nicht leicht ausführbar waren. Es ist daher sehr zu bewundern, daß schon Webers Ergebnis ($3{\cdot}1 \cdot 10^{10}$cm/sek) ganz nahe der Wirklichkeit war.

Als Umrechnungsfaktor vom elektrostatischen ins elektromagnetische Einheitssystem und umgekehrt kommt ganz allgemein der Faktor rund $3 \cdot 10^{10}$ zur Anwendung sowohl für die Mengeneinheit als auch für die anderen Einheiten, bei manchen derselben im Quadrat, je nach deren Herleitung, bei den technischen (QUS-)Einheiten noch mit Hinzufügung der betreffenden Zehnerpotenz. Wir haben diese Umrechnungsfaktoren schon bei Einführung der Einheiten jeweils angegeben.

[1]) S. Anhang E Va, 11.

Elektromagnete.

301. Stromspulen, Solenoide. — Den vervielfältigten Kreisströmen (295) stehen die spiralig, meist auf Zylinder gewickelten Stromspulen nahe; bei loser Wickelung mit freiem Raum zwischen den Drähten, die dann unisoliert sein können, nennt man sie auch Solenoide.

Das Kraftfeld des Solenoids kann nach bisher schon Festgestelltem leicht überlegt werden. Nebeneinander liegende Windungen tragen gleichgerichtete

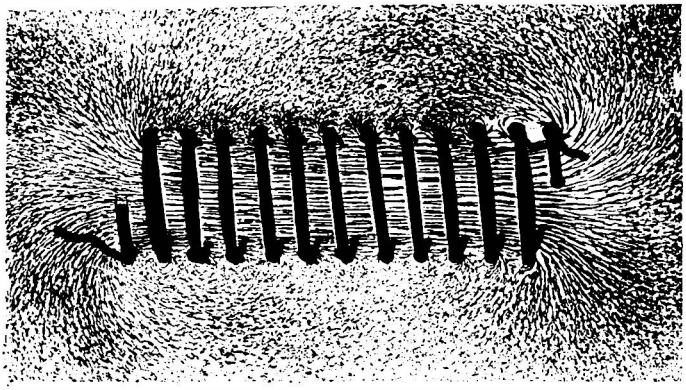


Abb. 36. Stromspule (lose gewundenes Solenoid).

Ströme, werden also, wie in Abb. 28 und 29, von gemeinsamen Kraftlinien umschlungen sein; nur in den Zwischenräumen der Windungen haben kurzgeschlossene Einzelkraftlinien Platz. Diametral entgegengesetzt liegende Drahtteile tragen entgegengerichtete Ströme; sie werden also, wie in Abb. 30 und 31, die zugehörigen Kraftlinien zwischen sich haben müssen, oder, was dasselbe ist: es kann auch jede Windung des Solenoids als Kreisstrom angesehen werden mit dem Kraftlinienlauf der Abb. 32. Daraus ergibt sich das in Abb. 36 ersichtliche, tatsächlich vorhandene, mit Eisenpulver aufgenommene Kraftfeld. Das Neuartige ist die große Zahl parallel laufender Kraftlinien im Inneren des Solenoids, die außen um sämtliche Windungen herum ihren Schluß finden; nur wenige Kraftlinien umkreisen Einzelwindungen. Je dichter die Windungen liegen, um so mehr treten diese kurzgeschlossenen Kraftlinien zurück, so daß für die dichtgewickelte Stromspule das Kraftlinienbild Abb. 37 entsteht. Mit Eisenpulver aufgenommen ist dasselbe in Abb. 38 zu sehen. Es war dabei die mehrere Windungslagen umfassende Spule in die schwarz erscheinenden Schlitze des Papiers eingeschoben, so daß diese Schlitze einen durch die Achse der Spule gehenden Querschnitt sämtlicher Drahtwindungen darstellen. Die Lage der

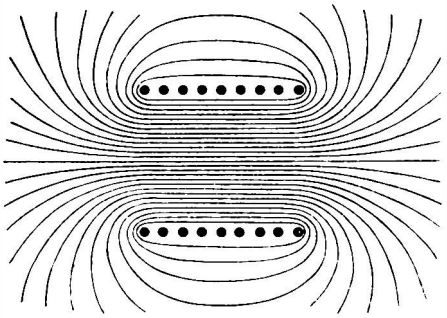


Abb. 37. Stromspule.

Mitte der Spulenlänge ist durch den Pfeil angegeben, von dessen Linie aus rechts und links alles symmetrisch ist.

Das Innere der Stromspule bietet ein überall gleichgerichtetes und gleich starkes, ein „homogenes" Magnetfeld, wenn sie genügend lang im Verhältnis zum Durchmesser ist. Die Kraftlinien laufen parallel, wie es die Abb. 36 und 38 zeigen, und sie sind auch — in richtiger Verteilung gezeichnet, wie in Abb. 37 — äquidistant. Die dem einfachen Kreisstrom zugehörige Verdichtung der Kraftlinien gegen die Drahtwindungen zu (285), ähnlich wie in Abb. 31 zu sehen, fällt bei der langen Spule weg; die Verdichtung ergäbe hier auch keine Verkürzung der Kraftlinien, die hier alle auf nahe gleich langen Wegen, also mit gleichem Drängen, nebeneinander herlaufen. Messungen zeigten in reichlichen

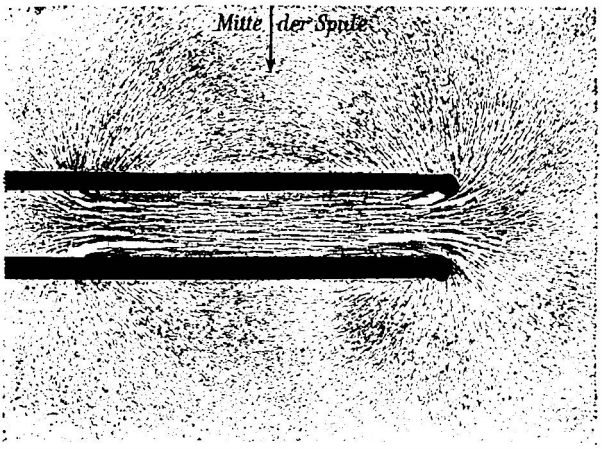


Abb. 38. Stromspule (dicht gewunden).

Anwendungen das Zutreffen der Homogenität des Feldes in genügend langen Spulen, und Spulen sind in der Tat das beste Mittel zur Herstellung homogener Magnetfelder mit dem besonderen Vorteil der leichten Veränderbarkeit der Feldstärke mittels Veränderung der Stromstärke.

Das Stromelementengesetz ergibt durch Rechnung ebenfalls die Homogenität des Feldes für das Innere einer (unendlich) langen Spule und zwar mit der Feldstärke $4\pi Jn/l$ Gauß, wenn J die Stromstärke in elektromagnetischen CGS-Einheiten, n die Windungszahl und l die Länge der Spule ist[1]). Ist J in Weber gegeben, so muß statt 4π $4\pi/10$ stehen (292). Jn ist dann die Anzahl der Weberwindungen, die auch hier — wie beim vervielfältigten Kreisstrom (295) — maßgebend ist für die Feldstärke.

302. Die elektromagnetische Ohm-Gleichung. — Die Gesamtzahl N der Kraftlinien einer (langen) Spule kann nach Vorigem stets leicht berechnet werden. Da alle diese N Kraftlinien durch das Spuleninnere gehen und da auf jedem cm^2 von dessen Querschnitt, q, die gleiche, durch die Feldstärke gegebene Kraftlinienzahl vorhanden ist (301), so ist, mit J in CGS, $N = 4\pi Jnq/l$. Dies kann auch geschrieben werden

[1]) Da diese Angabe für die Feldstärke genau nur für unendlich lange Spulen gilt, für welche $l = \infty$ und $n = \infty$ wäre, so kann bemerkt werden, daß n/l die Zahl der Windungen auf 1 cm Spulenlänge bedeutet, die stets endlich ist.

$$N = \frac{4\pi Jn}{l/q}, \qquad 302a)$$

in welcher Schreibweiſe eine bemerkenswerte Analogie mit Ohms Geſetz hervortritt (vgl. 156 u. f.). Wir hatten ſchon die Gleichheit von Magnetkraftlinien und Strömungslinien bemerkt, wonach man ein Magnetfeld auch als einen „Magnetkraftlinienfluß" oder kurz „magnetiſchen Fluß" bezeichnen kann (256). Die Stärke dieſes Fluſſes, nämlich die Zahl N ſeiner Kraftlinien, iſt nach Gl. 302a gegeben durch einen Bruch, ganz wie die Stärke eines elektriſchen Stromes nach Ohms Geſetz gegeben iſt. Der Zähler, $4\pi n J$ oder das $4\pi/10$-fache der Weberwindungen (295, 301), iſt das Analogon zur elektromotoriſchen Kraft in Ohms Geſetz und kann demnach „magnetomotoriſche Kraft" genannt werden; die Weberwindungen ſind beſtimmend für die Stärke des magnetiſchen Fluſſes, ſo wie die elektromotoriſche Kraft für die Stärke eines elektriſchen Stromes. Der Nenner, l/q, iſt das Analogon zum elektriſchen Widerſtand in Ohms Geſetz und kann „magnetiſcher Widerſtand" genannt werden. Der elektriſche Widerſtand iſt gegeben durch Länge und reziproken Querſchnitt des Leiters; ganz ebenſo iſt der magnetiſche Widerſtand l/q gegeben durch Länge l und reziproken Querſchnitt $1/q$ des Kraftlinienweges.

Dabei iſt, wie in Ohms Geſetz, für die richtige Berechnung der Stärke N des magnetiſchen Fluſſes der Geſamtwiderſtand als Summe der Einzelwiderſtände auf dem ganzen Kreisweges des Fluſſes einzuſetzen. Bei der langen Spule iſt der außerhalb derſelben liegende magnetiſche Widerſtand verſchwindend klein neben dem Widerſtand im Inneren der Spule, $1/q$, weil außen der Querſchnitt, auf welchem die Kraftlinien ſich verteilen, für den größten Teil ihres Weges unendlich groß iſt. Bei kurzen Spulen wird der Widerſtand an den Spulenenden, wo der Querſchnitt des Kraftlinienfluſſes noch klein iſt, weſentlich als Summand neben dem hier kleinen inneren Widerſtand; man fände alſo die Kraftlinienzahl N nach Gl. 302 a mit $1/q$ im Nenner zu groß. Es ſteht für dieſen Fall, wie auch ſonſt, das Stromelementengeſetz zur Berechnung der Magnetfelder zur Verfügung. Dieſe Rechnung wird jedoch für Stromſpulen in allen Fällen ſchwerfällig und unverhältnismäßig verwickelt; für manche, in Anwendungen wichtige Fälle iſt ſie durchgeführt und es ſtehen die Ergebniſſe zur Verfügung. Stets aber iſt die magnetiſche Analogie von Ohms Geſetz ein willkommener, vereinfachter Erſatz für das Stromelementengeſetz zur Berechnung der Magnetfelder von Stromſpulen, ſobald nur der Kraftlinienlauf von vornherein aus den Eigenſchaften der Kraftlinien genügend bekannt und einfach iſt.

Iſt in der Umgebung der Drähte der Stromſpule nicht leerer Raum (oder Luft), wie im Vorhergehenden angenommen, ſondern iſt die Umgebung von einem Stoffe der Permeabilität μ ausgefüllt, ſo iſt zu bedenken, daß dann die Zahl der Kraftlinien aufs μ-fache vergrößert iſt (251, 257). Es gilt dann — mit J in Weber — für die Geſamtzahl der Kraftlinien die magnetiſche Ohm-Gleichung:

$$N = \frac{(4\pi/10) \cdot Jn}{l/q\mu}. \qquad 302b)$$

Die Analogie mit Ohms Geſetz iſt wieder vollkommen; die Permeabilität μ iſt hier das Analogon zum elektriſchen Leitvermögen; ſie tritt bei Berechnung des magnetiſchen Widerſtandes $l/q\mu$ ebenſo ein wie das Leitvermögen bei Berechnung eines elektriſchen Widerſtandes. Iſt der Weg der Kraftlinien — der „magnetiſche Kreis" — nicht einheitlich in Querſchnitt und Permeabilität, ſo wird der magnetiſche Widerſtand aus ſeinen Teilen berechnet wie ein elektriſcher Widerſtand (157, 167).

Die Gleichung für N kann demnach stets ganz allgemein geschrieben werden:

$$\text{Magnetischer Fluß} = \frac{\text{Magnetomotorische Kraft}}{\text{Magnetischer Widerstand}}. \qquad 302c)$$

Der hier als magnetischer Widerstand auftretende Einfluß des zur Verfügung stehenden Raumes auf die Zahl der Kraftlinien, die ein gegebener Strom entwickelt, wurde bereits in einigen Sonderfällen hervorgehoben (284, 287).

Als Einheiten sind in Gl. 302b für J Weber, für l cm, für q cm^2 genommen. N ergibt sich, der Art der Einführung nach (Gl. 302a), nicht als bloße Zahl, sondern mit der Einheit Gauß · cm^2. Dividiert man N durch den an beliebiger Stelle vorhandenen Querschnitt des Kraftlinienflusses, so erhält man demnach die dort vorhandene (mittlere) Feldstärke in Gauß.

303. Feld der Stromspulen gleich dem von Stahlmagneten. — Zu eder Stromspule ließe sich ein Stahlmagnet herstellen, der ihr im Magnetfelde vollkommen gleich ist. Im gewöhnlichsten Fall einer zylindrisch gewickelten Spule wäre der Ersatzmagnet ein gleichmäßig magnetisierter Stahlzylinder, der ihre Höhlung füllt. Die Vergleichung der Kraftlinienbilder Abb. 36, 37, 38 mit Abb. 9 u. 14 zeigt dies. Die Spule hat Pole, nämlich Örter der Divergenz oder Konvergenz der Kraftlinien (241), wie der Magnetstab; sie liegen an ihren Enden. Bewegliche Magnete, Magnetnadeln, werden dementsprechend von der Spule in Bewegung gesetzt; sie verhält sich in jeder Beziehung wie ein Magnetstab, ohne Eisen oder Stahl zu haben, mit dem einen Unterschied nur, daß ihr Inneres von Luft erfüllt und zugänglich ist. Der Nordpol eines Stahlmagnets wird von dem einen Ende der Spule abgestoßen, welches Ende demnach Nordpol der Spule ist, vom anderen Ende, das Südpol ist, angezogen. Der angezogene Pol setzt dabei seinen Weg ins Innere der Spule fort, wenn nichts dagegen wirkt; ein Stahlmagnetstab gleitet ganz in die Spule hinein.

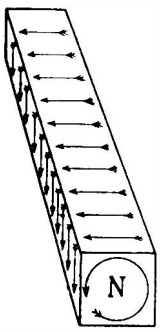


Abb. 39. Elementar-Stromrichtungen im Magnetstab.

Der einfache Kreisstrom hat das Kraftlinienfeld eines äußerst kurzen Stahlmagneten, dessen Querschnitt die Fläche des Kreisstromes füllt. Da dieser Ersatzmagnet des Kreisstromes nur aus zwei dicht aneinander liegenden flächenförmigen Polen besteht, kann er nach elektrischer Analogie (132) auch „magnetische Doppelschicht" genannt werden.

Um vorauszusehen, welcher Pol der Spule bei Stromschluß Nordpol wird, nehme man die Handregel (276) zu Hilfe; es muß Nordpol dasjenige Spulende sein, von welchem nach dieser Regel ein Nordpol weggetrieben wird. Man überlegt leicht, daß es das Ende ist, an welchem der Strom beim Besehen der Spule von außen her entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn kreist. Abb. 39 zeigt dies an einer quadratisch geformten Spule. Von der anderen Seite, gegen den Südpol besehen, kreist der Strom im Uhrzeigersinn.

Die Polstärke einer Stromspule ist $N/4\pi$, da N ihre gesamte Kraftlinienzahl und 4π die des Einheitspoles ist (265). Mit N nach Gl. 302a ist dies in CGS bei $\mu = 1$ Jnq/l.

Das magnetische Moment der Spule — Produkt aus Polstärke und Polabstand l (266) — ist demnach Jnq. Es ist, wie man sieht, unabhängig von der Länge der Spule und gilt daher so auch für den einfachen Stromkreis mit $n = 1$, dessen Moment somit Jq, Produkt aus der Stärke des Stromes und der von ihm umflossenen Fläche ist. Beim vielfachen Kreisstrom tritt

an Stelle dieser Fläche q das Produkt nq — Anzahl der Windungen mal Fläche von jeder —, welches auch „Windungsfläche" der Spule genannt wird.

304. Ampères Theorie des Magnetismus. — Die Gleichheit der Kraftfelder von Stromspulen und Magneten hat früh vermuten lassen, daß beide dasselbe sind, daß nämlich im Eisen- oder Stahlmagneten versteckte Ströme kreisen, und daß das Feld der Magneten nur Wirkung dieser Ströme ist. Abb. 39 gibt durch die Pfeile eine schematische Vorstellung von den Strömen, die in dem abgebildeten quadratischen Magnetstab dauernd kreisend zu denken wären. Allerdings können es nicht Ströme sein, die wie die Pfeile der Abbildung das ganze Eisen durchsetzen, da solche erfahrungsgemäß ohne dauernde Energiezufuhr schnell in Wärmewirkung sich erschöpfen würden. Die Ströme können aber auch nach aller an Magneten gemachten Erfahrung nur in den Elementarmagneten gesucht werden, aus welchen alle großen Magnete aufgebaut sind (233, 257). Diese Elementarmagnete, deren Natur durch die genannten Erfahrungen nicht weiter aufgeklärt worden ist, müssen kleine, geschlossene Ströme sein, die in den Atomen oder Atomgruppen des Eisens dauernd kreisen; dies war Ampères Hypothese vom Magnetismus. Daß die Kraftlinien solcher einzelner kleiner Kreisströme, wenn dieselben alle gleich gerichtet sind, zusammengenommen das Feld des ganzen Magneten ergeben würden, so wie es bei den einzelnen Windungen einer Spule oder auch bei einem Bündel eng gewundener Spulen zutrifft, dies war leicht einzusehen; jedoch die Annahme dauernd von selber immer weiter kreisender Ströme in Atomen oder Molekülen mußte lange ohne jede weitere Verbindung mit der Erfahrung bleiben und daher nur den Wert einer Vermutung (Hypothese) haben. Jetzt ist dies anders. Reichliche Erfahrung an den Kathodenstrahlen hat viel Anhalt dazu gegeben, dauernd bewegte, vielleicht kreisende Elektronen in allen Atomen zu denken (520 u. f.), und es sind auch weitere Tatsachen damit in Verknüpfung gekommen (349, 511), so daß man jetzt wohl von Amperes Theorie des Magnetismus sprechen darf.

Verwunderlich und noch nicht zu aller Befriedigung geklärt ist aber immerhin selbst die Tatsache, daß nur Eisenatome so sehr vorzugsweise Elementarmagnete abgeben, während alle anderen Atome so viel weniger dazu geeignet sind. Allerdings kann dies an den Besonderheiten der Elektrizitätsbewegungen in den Atomen liegen (vgl. 313), worüber aber noch zu wenig gute Kenntnis vorliegt. Unmittelbar verständlich erscheinen wohl die Drehungen, welche den Elementarmagneten beim Magnetisieren eines Eisen- oder Stahlstabes von Anfang der Kenntnis her zugeschrieben werden mußten (234, 257). Es wenden sich nicht notwendigerweise die Atome, Moleküle oder Molekülgruppen im Eisen, sondern die Kreisströme sind es, deren Ebenen wendungsfähig sein müssen, ohne daß Mitfolgen der anderen Teile der betreffenden Atome oder Atomgruppen notwendig ist. Ob oder wie die nach den Untersuchungen über Kathodenstrahlen unzweifelhaft in den Atomen vorhandenen Elektronen diese Kreisbewegungen machen, wird wohl später sicherzustellen sein. Ein Anfang dazu liegt in Versuchen vor, Kreiseleigenschaften an Magnetstäben messend nachzuweisen. Elektronen haben Masse, die im Verhältnis zu ihrer Ladung gut bekannt ist (453 u. f.); ihr Kreisen müßte daher bestimmte Trägheitsmomente und damit berechenbare Kreiselwirkungen ergeben (M 234 u. f.). Die Messungen zeigten diese Trägheitsmomente in den Magnetstäben kleiner als erwartet, woraus hervorgeht, daß die Elementarmagnete nicht einfach die in den Atomen gedachten Elektronenbahnen (vgl. 535, 536) sein können; vielleicht sind sie um die eigene Schwerpunktsachse rotierende Elektronen, Elektronenkreisel. Man hätte danach solche rotierende Elektronen, die an sich schon kleine Magnete wären, in den Atomen anzunehmen. Auch andere Untersuchungen, die Kraftfelder des Atominneren betreffend (546), haben dies nahegelegt. Sehr bemerkenswert ist dazu die Einsicht (368), daß alle durch Bewegung elektrischer Kraftlinien erzeugte Magnetfelder, wie die der Elektromagnete,

ihre Ursprünge an den Enden der bewegten elektrischen Kraftlinien haben, dort wo die Elementarquanten der Elektrizität sitzen, wonach diese Elementarquanten, zumal die beweglicheren, die Elektronen, als die Entstehungsherde aller Magnetfelder erscheinen, auch ohne daß ihr Schwerpunkt Kreisbahnen beschriebe.

Man kennt die Eigenschaften der Elektronen, wie sie nach Befreiung aus den Atomen sich zeigen, einigermaßen (458), aber nicht allzusehr (76, 464); doch innerhalb der Atome ist zunächst das meiste noch dunkel (536, 546). Dies ist immer zu bedenken, wenn wir kurz von den „Kreisströmen" der Elementarmagnete reden werden; es sind damit Elektrizitätsbewegungen gemeint, die jedenfalls in ihrer Umgebung dasselbe Magnetfeld haben wie Kreisströme.

305. Stromspulen und weiches Eisen. — Weiches Eisen erfährt, wie stets (250) so auch bei Stromspulen, Kräfte, die es nach den stärkeren Teilen des Feldes treiben. Bewegliche Eisenstücke werden daher ins Innere der Spule gezogen, wo das Feld am stärksten ist. Die Kräfte, mit denen dies geschieht, können leicht sehr groß werden, um so mehr als das Spulenfeld sofort stark anwächst, wenn das Eisen in die Öffnung der Spule kommt, weil dann der magnetische Widerstand (302) stark sinkt und also die Kraftlinienzahl entsprechend steigt.

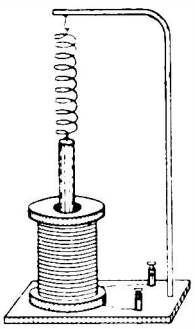


Abb. 40. Stromspule und weiches Eisen (Weicheisen-Galvanometer).

Auf dem Hineingezogenwerden von Eisen in die Stromspule beruht eine besondere Galvanometerart, das „Weicheisengalvanometer". Abb. 40 zeigt ein solches in ursprünglicher Form. Kontrollkraft gibt die Spiralfeder, an welcher der Stab weichen Eisens hängt. Jeder Stromstärke entspricht eine gewisse Tiefe des Eindringens des Stabes; es kann mit dem Stab ein Zeiger verbunden sein, der dann an einer Skale die Stromstärke ablesen läßt.

Die Graduierung muß empirisch, durch Eichung mit anderen Galvanometern bzw. mit einem Voltameter erfolgen. Die Skalenteile für je 1 Weber fallen stets ungleich aus wegen des schon bemerkten Steigens des Feldes beim steigenden Eindringen des Eisens. Daß die Kräfte nicht linear mit der Stromstärke steigen können, wohl aber ungefähr quadratisch, dies folgt schon aus der Nichtumkehr der Kraftrichtung bei Umkehr der Stromrichtung. Das Genauere hängt von der Formung des Eisenstabes ab. Da Drehbewegung Vorteile hat, werden Spulen und Eisenstab meist in Kreisbogenform gekrümmt; die Achse, die Stab und Zeiger trägt, sitzt im Kreismittelpunkt; eine ebene Spiralfeder liefert die Kontrollkraft. Solche sehr einfach herzustellende Strommesser, auch Spannungsmesser (165), dienen als gewöhnlichste Schalttafelinstrumente.

306. Elektromagnete mit Eisenkern. — Sobald Eisen im Inneren einer Stromspule ist, ist deren Magnetfeld wesentlich verstärkt wegen des geringen magnetischen Widerstandes im Eisen (302). Die Kraftlinien laufen dann aus diesem Grunde auch zumeist im Eisen und nur wenig im etwa noch verbleibenden Luftraum des Spuleninneren. Abb. 41 zeigt dies mit Eisenfeile an einer Stromspule (derselben wie in Abb. 38), in deren Achse zentrisch ein unmagnetischer weicher Eisenstab eingeschoben ist, der nur einen geringen Teil ihres Querschnittes füllt. Der Stab ragt an beiden Enden der Spule gleich viel vor; rechts in der Abbildung ist die Hervorragung unmittelbar zu ersehen. Man bemerkt bei Vergleichung mit Abb. 38, daß der Eisenstab das Feld wesentlich verändert hat. Es ist nahe gleich dem Feld eines Stahlmagneten von der Form des Eisenstabes geworden (vgl. Abb. 9). Die der Spulenachse parallelen Kraftlinien laufen jetzt im Inneren des Eisens und sind deshalb nicht abgebildet; sie laufen auch großenteils bis ans Ende des Eisens in dessen Inneren, weil

ſie dort den geringen magnetiſchen Widerſtand finden; die Pole der Spule ſind ſomit nahezu an die Enden des Eiſens verlegt.

In dieſer Weiſe iſt mittels der Stromſpule ein Magnet — „Elektromagnet" — aus dem weichen Eiſen geworden. Das Kraftfeld desſelben entſteht mit Stromſchluß der Spule und verſchwindet mit demſelben. Dieſe leichte Beherrſchung des Kraftfeldes, die noch dazu mittels Fortleitung des Stromes aus der Ferne ſtattfinden kann, zuſammen mit der erheblichen Stärke der erreichbaren Felder, hat frühe zu erſten Anwendungen der Elektromagnete geführt. Die ganze „Schwachſtrom-Technik" entwickelte ſich daraus, wovon hier nur die elektromagnetiſche Telegraphie genannt ſei.

Die meiſten Kraftlinien erhält die Stromſpule, wenn ihre Höhlung ganz mit Eiſen gefüllt iſt, wenn ſie alſo etwa auf einen Eiſenſtab gewickelt iſt, weil dann der magnetiſche Widerſtand am kleinſten wird (302).

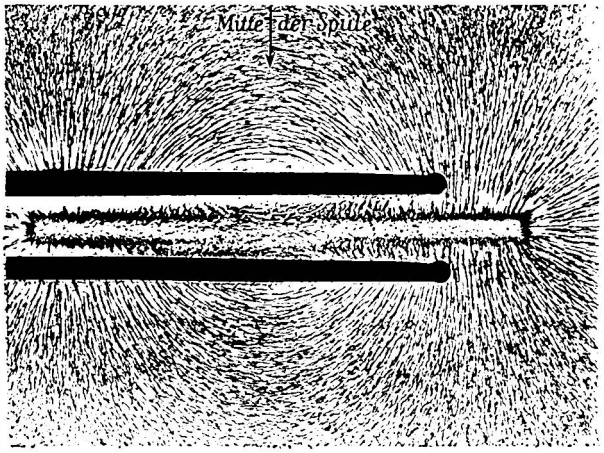


Abb. 41. Stromſpule (dicht gewunden) mit Eiſenſtab.

Für größte Kraftwirkungen auf einen Eiſenanker iſt U-Form des Elektromagnets geeignet. Der Kraftlinienlauf iſt dann ähnlich dem beim Hufeiſen-Stahlmagneten betrachteten (Abb. 11), nur daß hier die vielen unnütz von Schenkel zu Schenkel laufenden Kraftlinien vermieden werden können, wenn die Spulenwindungen bis dicht an die Enden der Schenkel reichen und dieſe nicht unnötig lang ſind. Im übrigen iſt es gleichgültig, wie die vorhandenen Weberwindungen (295) am Eiſen verteilt ſind; ſie können auch vom gebogenen Teil des Eiſens fernbleiben, wie in Abb. 46 a und b.

307. Stromſpulen ſind auch das beſte Mittel, *Stahlmagnete zu machen*. Iſt der in die Spule geſteckte Stab nicht weiches Eiſen, ſondern Stahl, ſo können ihm nach Stromöffnung von je μ Kraftlinien $\mu-1$ für die Dauer bleiben (257), ſofern die „Remanenz" und „Koerzitivkraft" ausreicht[1]). Klopfen des Stabes während des Stromlaufes, auch ein überlagertes, allmählich abnehmendes Wechſelfeld, helfen zur Annahme möglichſt vieler Kraftlinien (Wendung der Elementarmagnete). Man erhält ſo ſehr viel ſtärkere „*permanente*" *Magnete* als durch Streichen mit ſchon vorhandenen Magneten oder mit Magnetſteinen (229), welches letztere ganz außer Gebrauch gekommen iſt.

[1]) Die meiſten Kraftlinien halten Stahllegierungen mit Wo, Cr, Co, Al-Ni feſt.

308. Elektromagnete sind auch das Mittel zur Herstellung höchster Magnetfeldstärken. Es muß dazu die Gesamtzahl der Kraftlinien möglichst groß und der Querschnitt, auf welchem sie sich in der Luft, an der nutzbaren Stelle verteilen, möglichst klein gemacht werden. Beides wird am besten durch ringförmiges Zusammenbiegen des Eisenkerns erreicht, so daß nur ein kleiner Luftzwischenraum von Eisen zu Eisen — von Pol zu Pol — übrig bleibt, welcher dann Sitz des starken Feldes ist.

Zur Erreichung größter Kraftlinienzahlen muß die magnetomotorische Kraft, d. i. die Zahl der Weberwindungen, möglichst groß, der magnetische Widerstand aber möglichst klein, also das Eisen möglichst kurz und dick genommen werden (302). Man sieht, daß diese beiden Erfordernisse gegeneinander gehen; denn die vielen Weberwindungen verlangen Raum für das Kupfer in der Ringöffnung des Eisenkerns; Kürze und Dicke des Eisens verringern aber eben diesen Raum. Es handelt sich daher immer um günstigste Verteilung des vor-

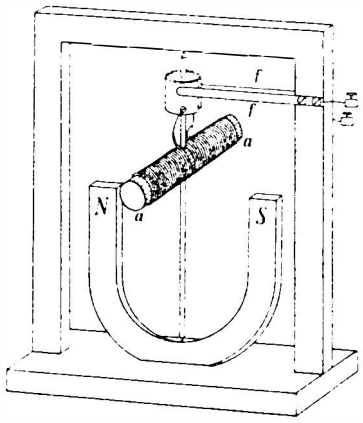


Abb. 42. Elektromotor-Modell.

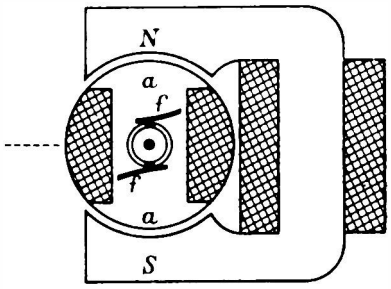


Abb. 43. Elektromotor mit gutem Eisenkreis. Anker (Doppel-T) nur in einer Ebene bewickelt.

handenen Raumes zwischen dem Kupfer und dem Eisen. Man kommt hier auf die beiden einander umschließenden Kreise (278, Abb. 26) zurück: Kraftlinienkreis („Eisenkreis", „magnetischer Kreis") und Strombahn („Kupferkreis"); beide zusammen sollen allen Zwischenraum füllen.

Für Berechnungen hierzu ist die magnetische Ohm-Gleichung (302) maßgebend; die Schwierigkeit liegt dabei in der Inkonstanz der Permeabilität μ des Eisens (258). Man übersieht aber ohne weiteres, daß Magnete mit langen Schenkeln zwecklos sind, weil die vielen Weberwindungen, die sie gestatten, durch den großen magnetischen Widerstand der Schenkel wirkungslos gemacht werden. Man sieht auch beispielsweise, daß der Magnet der Abb. 46 durch dickeres Eisen und mehr Windungen verbessert werden könnte, da noch Raum dafür vorhanden ist. Beim Magneten des schematisch gezeichneten Elektromotors Abb. 43 mit seinem Anker (oder Läufer) a a, der ebenfalls Elektromagnet ist (vgl. 309), ist aller Raum gut benutzt, um seine Kraftlinienzahl möglichst zu steigern. Es ist ein möglichst geschlossener Eisenkreis für den Kraftlinienfluß vorhanden (Eisen in der Abbildung weiß, Drahtwindungen im Querschnitt schraffiert), so daß zwischen den Polschuhen NS und dem Anker a beiderseits nur ein sehr sehr schmaler Luftzwischenraum bleibt, und der Eisenkreis umschließt keinen Raum, der noch gut mit Drahtwindungen ausgefüllt werden könnte. Man vergleiche im Gegensatz dazu Abb. 42 mit schlechtem Eisenkreis (s. 309).

Der Querschnitt, auf welchen die Kraftlinien eines Elektromagneten zwischen seinen Polen sich verteilen, kann durch Verringerung des Eisendurchmessers

gegen die Pole hin (wie in Abb. 48) klein gemacht werden, was ſomit bei gleichzeitig kleinem Polabſtand die ſtärkſten Felder gibt, wenn auch nur in kleinerem Raum. Verengerung des Polzwiſchenraumes verſtärkt in doppelter Weiſe das Feld; es wird der magnetiſche Widerſtand in der Luft und auch der Querſchnitt verkleinert, auf welchen die immer etwas ſeitlich ausbiegenden Kraftlinien ſich verteilen.

Weiche Eiſenſtücke, „Polſchuhe", die man auf die Enden des Eiſenkerns ſetzt, wie in Abb. 46a und b zu ſehen, geſtatten je nach Bedarf mehr Raum für das Feld zu machen, wenn die Größe des darin zu unterſuchenden Gegenſtandes es erfordert (wie in den Abb. 46) — was auf Koſten der Feldſtärke geſchieht — oder aber bei zuſammengerückten Polſchuhen (wie in Abb. 48) ein engeres aber verſtärktes Feld zu erhalten. Verfügbarkeit ſtarker Ströme iſt ſtets von weſentlichem Vorteil, weil dann die Weberwindungen nicht durch die Windungszahl geſteigert werden müſſen, was viel Raum mit Iſoliermitteln ſtatt mit Kupfer füllt. Kühlung der Leiterwindungen erlaubt ſtets Steigerung der Felder, weil dann ſtärkere Ströme ohne Schaden angewandt werden können. Man hat ſo Felder von rund 100000 Gauß hergeſtellt. Eine obere Grenze iſt dies nicht; beſonders kann man für kurze Zeiten, in denen die Stromwärme noch nicht ſich häuft, leicht viel höhere Feldſtärken erreichen.

309. Elektromotoren. — Vorrichtungen zur Umwandlung elektriſcher Energie in mechaniſche wurden ſchon bald nach Einführung der Elektromagnete

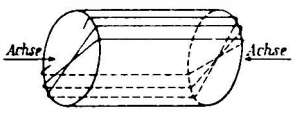


Abb. 44. Trommelanker-Wickelung (Schema).

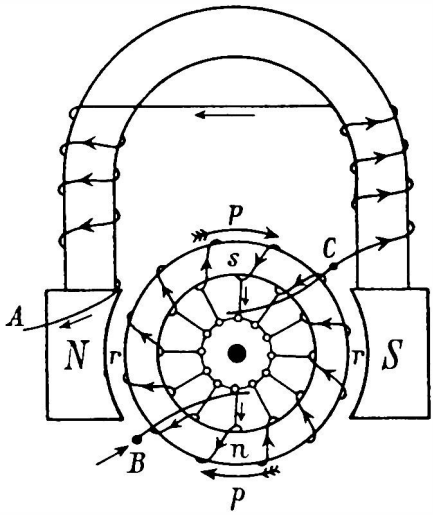


Abb. 45. Motor mit Ringanker (Leitungsſchema). Drehrichtung den Pfeilen p p entgegen.

erdacht und in kleinem Maßſtab ausgeführt. Auch in den jetzt ſehr vollkommenen Elektromotoren iſt ſtets der Zug der Magnetkraftlinien zwiſchen entgegengeſetzten Polen das Wirkſame.

Ein altes Modell, Abb. 42, zeigt ſchon das Weſentliche. Der Magnet NS („Feldmagnet", „Standmagnet"), hier Stahlmagnet, in Abb. 43 Elektromagnet, gibt das Feld, in welchem der Anker („Läufer") a a, der immer Elektromagnet ſein muß, um ſeine Achſe beweglich iſt. Die Stromzuleitung erfolgt durch Schleiffedern („Bürſten") f f (in Abb. 43 ohne die Zuleitungen nur angedeutet) und einen ſelbſttätigen an der Achſe ſitzenden Stromwender, der den Strom umkehrt, ſobald entgegengeſetzte Pole von Anker und Feldmagnet zuſammengekommen ſind, damit das Drehmoment der Magnetkräfte immer weiter in gleichem Sinne gerichtet bleibt. Bei ſo einfacher Ankerwickelung wie in den Abb. 42 und 43 iſt jedoch das Drehmoment inkonſtant; es

wird, wie leicht einzusehen, an zwei „toten Punkten" bei jeder Umdrehung Null (Abb. 43 zeigt eine solche Lage des Ankers). Um ein gleichbleibendes Drehmoment und zugleich einen in jeder Ankerlage gleich guten Eisenkreis zu haben, legt man die Ankerwindungen nicht nur, wie in den Abb. 42 und 43, parallel der einen, durch die Achse gehenden Ebene (die in Abb. 43 punktiert angedeutet ist), sondern gleichmäßig über alle durch die Achse gehenden Ebenen verteilt, wie es Abb. 44 andeutet. So wird der Eisenkern des Ankers ebenfalls rings um die Achse gleich beschaffen; er wird Rotationskörper — „Trommelanker" (Abb. 44) oder „Ringanker" (Abb. 45) — an Stelle des „Doppel-T-Ankers" von Abb. 43. Der Stromwender an der Achse — dann besser „Verteiler" zu nennen — muß nun statt zwei an den Federn oder Bürsten schleifenden Metallstücken entsprechend mehr umfassen, wie es in Abb. 45 ersichtlich ist. Die Ankerbewickelung ist dann in sich zurücklaufend geschlossen, und es gehen die in der Abb. 45 speichenförmig sichtbaren Abzweigungen von gleichabstehenden Punkten der Wickelungen an ebenso viele Metallstücke des Verteilers, an welchen die Strom zu- und ableitenden Bürsten schleifen.

Wir kommen auf diese Einrichtungen noch zurück, weil sie ebensogut als Stromerzeuger durch Induktion (375), „Dynamomaschinen", dienen können, wie als Motoren.

Der für alle solche Elektromotoren wesentliche Teil des Stromlaufes und seine Magnetisierungswirkungen mögen am Beispiel der Abb. 45 (Ringanker) erläutert werden. Der Strom tritt bei B ein und kommt, immer den Pfeilen nach, an die unterste Stelle (n) der Ringwickelung, wo er sich in die beiden Ringhälften teilt, um oben (bei s) wieder vereint zu werden, von C an die Feldmagnetwickelung zu durchfließen und bei A wieder auszutreten. Durch diesen Strom werden — wie nach bekannter Regel (303) leicht zu sehen — die beiden Ringhälften wie zwei Hufeisenmagnete so magnetisiert, daß sie beide und somit der ganze Ring oben bei s Südpol, unten bei n Nordpol haben. Der Feldmagnet erhält ebenfalls Pole N und S. Man sieht, daß der Ring mit einem Drehmoment entgegengesetzt den angegebenen Pfeilen sich bewegen wird[1]). Während er dies tut, kommt unten und oben ein nächstes Metallstück des Verteilers an die Bürsten, was die Wirkung hat, daß immerfort der Strom unten in den Anker eintritt und oben austritt, so daß immerfort die Pole n und s ihre Lagen unten und oben behalten, womit auch das Drehmoment immer das gleiche bleibt.

Erst nach Einführung des guten Eisen- und Kupferkreises (308), wobei nirgends unnötige, noch mit Eisen oder Kupfer zu füllende Zwischenräume verbleiben, wie am Beispiel der Abb. 43 schon erläutert (308), und der Rotationskörperform des Ankers, zusammen mit dem Verfügbarwerden größerer elektrischer Energiemengen (durch Induktion, 375), als Elemente sie zu liefern vermochten, konnten die Elektromotoren ihre jetzt so umfassende Bedeutung als Antriebsmaschinen erhalten.

310. Magnetismus aller Materie; Diamagnetismus. — In den starken Feldern der Elektromagnete zeigte es sich, daß nicht nur Eisen, Kobalt und Nickel magnetische Eigenschaften — eine von $\mu = 1$ abweichende Permeabilität — besitzen, sondern daß dies, wenn auch in meist sehr geringem Maße, bei aller Materie zutrifft.

Zur Untersuchung hängt man am besten den zu prüfenden Stoff in Stäbchenform leicht drehbar zwischen flachen, ein homogenes Feld gebenden Polschuhen eines Elektromagneten auf, wie es Abb. 46 zeigt, schließt den Strom und sieht zu, ob eine bestimmte Einstellung des Stäbchens erfolgt, um die es als Gleichgewichtslage schwingt, bis es dort zur Ruhe kommt. Alles was größere Permeabilität hat als die umgebende Luft muß mit der Längsrichtung in die Kraftlinienrichtung des Feldes sich stellen, weil es gegenseitige Eigenschaft der Kraftlinien und der Materie ist (250), nach der Permeabilität der letzteren möglichst so sich einzurichten, daß die Kraftlinien den Weg größter Permeabilität

[1]) Die Pfeile p p der Abb. 45 geben die Drehrichtung zur Erzeugung des angezeichneten Stromes (mittels Induktion) an, wenn der Motor als Dynamomaschine benutzt wird (375).

haben. Dies ist der Fall, wenn der Kraftlinienweg auf längster Strecke in den Stoff größerer Permeabilität kommt; daher die Längsstellung der Stäbchen. Bei Eisen ist die Längsstellung schon in schwächsten Feldern zu sehen. In stärkeren Feldern geht Eisen außerdem sofort an die Polschuhe, weil seine Anwesenheit das Feld inhomogen macht, nämlich immer dort stärker, wo das Eisen dem Polschuh schon ein wenig näher ist, worauf das Eisen nach eben dieser Seite hin auch einen stärkeren Zug erhält (250).

In stärksten Feldern findet man keinen Stoff, der nicht Einstellung zeigte. Alle gewöhnlichen Eisen-, Nickel- und Kobaltsalze stellen sich in Kraftlinienrichtung ein, auch in Lösungen (die in vorher leer geprüfte Röhrchen zu füllen

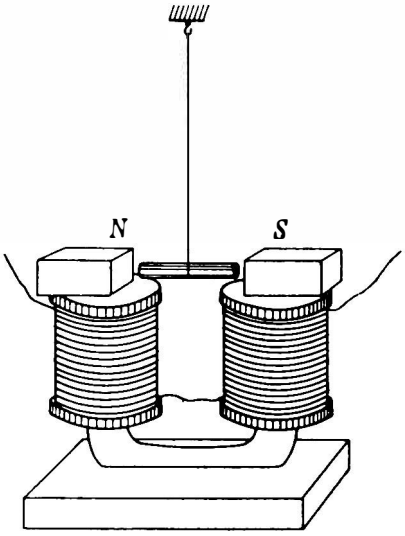


Abb. 46a. Elektromagnet mit magnetischem Stab.

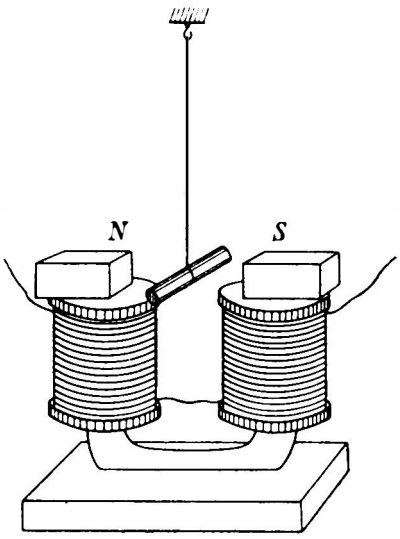


Abb. 46b. diamagnetischem

sind); ebenso aber auch Mangan, Chrom, Platin und viele andere Elemente, rein und in Verbindungen, besonders auch die seltenen Erden Ce, Er, Sm. Allerdings kommt es bei solchen Prüfungen immer auf äußerste Eisenfreiheit an; geringster Eisengehalt kann bei der überwiegend großen Permeabilität des Eisens Magnetismus vortäuschen, wo er nicht vorhanden ist.

Dagegen zeigt sich etwas Anderes und Neues bei einer Reihe von Stoffen, wie Wismut, Gold, Schwefel; sie stellen sich mit der Längsrichtung *quer zu den Kraftlinien* (Abb. 46b), weichen also diesen möglichst aus, haben geringere Permeabilität als die Luft. Die Querstellung erfolgt aber auch im Vakuum, dessen Permeabilität Einheit ist; die Permeabilität dieser Stoffe ist daher kleiner als 1. Man nennt sie *diamagnetisch* (Faraday, 1845).

311. *In inhomogenem Felde* werden diamagnetische Körper aus den stärkeren Feldteilen herausgetrieben, während magnetische in dieselben hineingezogen werden (250). Abb. 47 zeigt eine am Faden aufgehängte Wismut-

kugel zwischen gegeneinander geneigten Polschuhen; sie schwebt fast außerhalb des Zwischenraumes, wie durch einen Luftstrom aus den stärkeren Teilen des Feldes herausgeblasen. Nach Öffnen des Magnetstromes sinkt sie wieder zurück.

Flüssigkeiten können am besten im „magnetischen Manometer", Abb. 48, untersucht werden (Quincke 1885), wobei aller Gefäßeinfluß ausgeschaltet ist. Der enge Schenkel des Rohres befindet sich im starken Felde, zwischen den Polschuhen N S, der weite außerhalb, wo das Feld genügend nahe Null ist. Magnetische Flüssigkeiten, wie z. B. Eisenchloridlösung, steigen zwischen den Polen, wie es die Abbildung zeigt, diamagnetische, z. B. Wasser, sinken. Hier arbeiten die magnetischen Kräfte in leicht zu berechnender Weise gegen die Schwere, so daß aus Beobachtungen in gemessenen Feldern leicht der Zahlenwert der Permeabilität der Flüssigkeit nach den bereits betrachteten Zusammenhängen (275) ableitbar ist.

Auch von festen Körpern können Permeabilitäten durch Kraftmessungen an Stäben ermittelt werden, deren eines Ende im Felde sich befindet, ähnlich der Flüssigkeitssäule im magne-

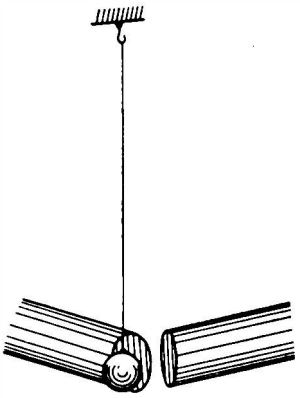


Abb. 47. Wismutkugel aus dem (inhomogenen) Feld gestoßen.

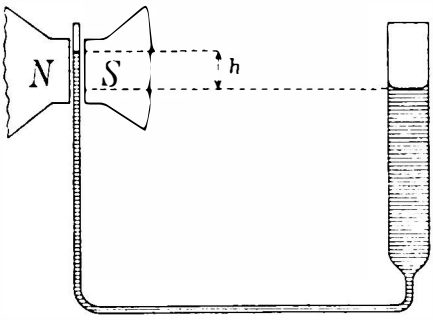


Abb. 48. Magnetisches Manometer mit Eisenchloridlösung.

tischen Manometer, und überhaupt dienen Fälle gut berechenbarer Kräfte (275) zur Ermittelung von Permeabilitäten.

Große Permeabilitäten, wie die von Eisenproben, findet man durch Herstellung magnetischer Kreise mit ihnen, Messung der entstehenden Magnetfelder und Rechnung nach der magnetischen Ohm-Gleichung (302).

Tab. 49 (251) gibt eine Übersicht der Reihenfolge verschieden großer Permeabilitäten, vom stärkstmagnetischen Eisen angefangen bis zur kleinsten, tiefst unter 1 liegenden Permeabilität des diamagnetischen Wismuts. Die Differenz $\mu - 1$ gibt überall das Maß für die Stärke des Magnetismus, bez., bei negativem Vorzeichen, des Diamagnetismus des Stoffes. Man sieht, daß der Diamagnetismus überall, selbst auch bei Wismut, nur schwach vertreten ist; kein Stoff ist auch nur annähernd so stark diamagnetisch wie Kobalt oder Nickel magnetisch sind. Über die Besonderheiten der Permeabilität des Eisens wurde schon früher berichtet (258).

Die Luft ist schwach magnetisch, was ihrem Sauerstoffgehalt zugehört. Läßt man Kohlensäure ins Magnetfeld ausströmen, so wird sie herausgetrieben, aber wohl nicht weil sie diamagnetisch wäre — wie man früher meinte[1]) —, sondern weil sie noch weniger magnetisch ist als die Luft. Eine Flamme, z. B. einer

[1]) In Tab. 49 ist die Trennungslinie zwischen magnetisch und diamagnetisch in der Gegend von Kohlensäure wohl noch unsicher.

Öllampe, zwischen spitze Polschuhe, somit in ein inhomogenes Feld gebracht, teilt sich entzwei, als würde sie aus den stärksten Teilen des Feldes herausgeblasen; die Ursache ist der gegenüber Luft schwache Magnetismus der kohlensäure- und stickstoffhaltigen Verbrennungsgase, bzw. der Diamagnetismus des Wasserdampfs. Besonders bei den Gasen und auch sonst bei schwach magnetischen Stoffen ist, wie diese Beispiele zeigen, der geringe Magnetismus der Luft nicht außer acht zu lassen.

Daß im materiehaltigen Raume stets nur Unterschiede von Permeabilitäten zur Wirkung kommen, dies kann in folgender Weise besonders ersichtlich gemacht werden. Es befinde sich zwischen den beiden Polschuhen des Elektromagneten Abb. 46 ein Glastrog, der zunächst nur Luft enthalte, und es sei in demselben ein Stäbchen schwach magnetischen Stoffes (wie etwa rotes Klebwachs, das Eisenoxyd enthält) aufgehängt. Das Stäbchen stellt sich bei Herstellung des Feldes kräftig in die Kraftlinienrichtung, wie in Abb. 46a. Füllt man nun aber den Trog mit einer genügend magnetischen Flüssigkeit (z. B. $MnSO_4$-Lösung), so daß das Stäbchen in derselben untergetaucht ist, so stellt sich dieses selbe Stäbchen quer zu den Kraftlinien, wie in Abb. 46b. Es wird stets der Stoff größerer Permeabilität in den Kraftlinienweg gezogen. In dieser Weise können auch Permeabilitäten von Gasen untersucht werden, indem man ein geeignetes Probestäbchen abwechselnd in den Gasen und im Vakuum beobachtet.

Bemerkenswert ist, daß bei Kristallen die Permeabilität in verschiedenen Richtungen verschieden groß ist. Man sieht dies unmittelbar, wenn man eine aus dem Kristall geschliffene Kugel im Magnetfeld aufhängt. Die Kugel nimmt eine feste Einstellung an, was bei allseitig gleich großer Permeabilität nicht der Fall wäre; sie stellt sich so, daß möglichst ihre Richtung größter Permeabilität in Kraftlinienrichtung kommt. Bei Kalkspat beispielsweise steht diese Richtung senkrecht zur kristallographischen und optischen Achse (Rhomboederachse x x, Abb. 55, Bd. III). Die Richtungsabhängigkeit der Permeabilität der Kristalle ist nur ein besonderes Beispiel der Richtungsabhängigkeit aller Eigenschaften in ihnen, wie auch der Zugfestigkeit, der Wärmeleitfähigkeit (W 143), der Dielektrizitätskonstante und auch der Lichtgeschwindigkeit in ihnen, worauf wir schon ihre optischen Besonderheiten beruhen sahen (O 177).

312. Als ein Beispiel für die Abhängigkeit des Magnetismus chemischer Verbindungen von der Bindungsweise der Atome in ihnen ist das gelbe Blutlaugensalz (Ferrozyankalium, $K_4FeC_6N_6$) bemerkenswert, das trotz seines starken Eisengehaltes diamagnetisch ist, während einfachere Eisenverbindungen einen ihrem Eisengehalt proportionalen Magnetismus zeigen, Oxydsalze jedoch etwas mehr als Oxydulsalze, immer aber so, daß die Salze viel weniger magnetisch sind als Gemenge mit gleichem Gehalt freien, metallischen Eisens es wären.

Der Einfluß der Bindung auf den Magnetismus der Atome zeigt Beteiligung der Valenzelektronen (182) an den Kreisströmen der Elementarmagnete in den Atomen an.

Der sehr starke Magnetismus freien, metallischen Eisens kann in besonderen Gruppenbildungen der Eisenatome seine Ursache haben, wie auch der Einfluß der Temperatur auf den Magnetismus (258) Atomgruppen als Elementarmagnete im metallischen Eisen erkennen ließ. Die als Elementarmagnete wirksamen Gruppierungen müssen jedenfalls Einzelbeweglichkeit der Atome zulassen, weil diese Beweglichkeit durch die spezifische Wärme des Eisens gesichert ist (W 119).

Legierungen von Metallen zeigen, wie auch sonst in jeder Beziehung

(vgl. M 273, W 8, 197, E 169) Besonderes; so haben gewisse Cu- und Mn-haltige, aber eisenfreie Legierungen auffallend große Permeabilitäten.

Der Magnetismus von Salzen verliert sich sofort bei Abstellung des äußeren Magnetfeldes; sie zeigen keine Remanenz (229); die durch das äußere Feld geordneten Elementarmagnete geraten sofort wieder in Unordnung. Hierbei tritt ein Sinken der Temperatur des Salzes ein; es wird ein Teil der Energie der Wärmebewegung im Salze zu Arbeit gegen die Felder der Elementarmagnete verbraucht. Diese Wirkung ist bei anfänglich schon tiefer Temperatur gesteigert, wie überhaupt die magnetischen Eigenschaften in tiefer Temperatur steigen (258). Es konnte daher diese Kältewirkung bei Abschaltung eines Magnetfeldes bei geeigneten Salzen (wie Eisen-Ammoniumsulfat) sogar vorteilhaft zu äußerster Annäherung an den absoluten Nullpunkt der Temperatur benutzt werden.

313. Als Erklärung des Magnetismus haben wir bereits das Vorhandensein wendungsfähiger elektrischer Kreisbewegungen in den Molekülen (Atomen) gefunden (304). Eine Erklärung des Diamagnetismus ergibt sich etwas später (349). Es sei nur sogleich bemerkt, daß Magnetismus und Diamagnetismus im selben Stoff einander nicht ausschließen, da sie auf Vorgängen beruhen, die gleichzeitig vorhanden sein können. Sie verdecken dann einander in der Wirkung. Man darf daher nicht schließen, daß schwach magnetische oder diamagnetische Stoffe wenig oder gar keine Elementarmagnete (wendungsfähige Kreisströme) enthielten; es könnten dieselben durch gleichzeitig vorhandenen Diamagnetismus verdeckt sein.

Magnete und Ströme.

314. Die Gegenkräfte zu den magnetischen Kräften der Ströme. — Nach der in der Mechanik zusammengefaßten, allgemeinen Erfahrung gehört zu jeder Kraft eine gleich große Gegenkraft (M 209, 215 u. f.) und entsprechend auch zu jedem irgendwo vorhandenen Drehmoment ein ihm entgegengesetzt gleiches (M 230 u. f.). Gilt dies auch für die im Vorhergehenden behandelten, von Strömen auf Magnete ausgeübten Kräfte, so müssen auch die zugehörigen Gegenkräfte vorhanden sein, ausgeübt von Magneten auf Ströme. Es zeigt sich, daß dem wirklich so ist; man hat nur, statt der festgehaltenen Stromleiter und der beweglichen Magnete jetzt festgehaltene Magnete und bewegliche Stromleiter zu nehmen.

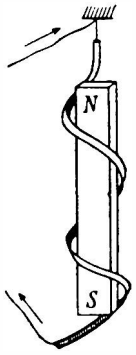


Abb. 49. Stromband und Magnetstab.

Abb. 49 verwirklicht dies in einem einfachen Fall. Der Magnet N S ist durch eine (nicht abgebildete) seitliche Stütze in vertikaler Lage festgehalten; ein leichtes Metallband hängt ohne Strom neben ihm herab. Schließt man den Strom im Metallband, so windet es sich sogleich spiralig um den Magneten herum, wie es die Abbildung zeigt. Wenden des Stromes im Metallband bewirkt sofortiges Abwickeln des Bandes und Aufwickeln in entgegengesetztem Schraubensinn. Die Erklärung aus der Gegenkraft ist einfach: Der Strom würde die Pole des Magneten um sich drehen, wie es seinen Kraftlinien entspricht, und ebenso drehen auch die Pole den Stromleiter um sich. Die Handregel (276) gibt die Drehrichtung für einen Nordpol von festem Strome aus an; entgegengesetzt ist die Drehrichtung für den Strom von festem Pol aus, was mit der in der Abbildung durch die Pfeile angegebenen Stromrichtung stimmt. Da den entgegengesetzten Polen entgegengesetzte Drehrichtungen entsprechen, muß das Band in die Windungen

sich legen. Ein biegsamer Magnet würde um einen starren Stromleiter ebenfalls sich winden, wenn er an vollständiger Querstellung verhindert ist.

315. Dauernde Drehbewegung eines Stromleiters um einen Magnetpol kann man erhalten, wenn man die Wirkung des anderen Poles, der entgegengesetzte Drehung gäbe, ausschaltet. Dies ist in sehr einfacher Weise in der Vorrichtung Abb. 50 geschehen. Der Magnet N S trägt mittels des Korkes K einen Glaszylinder, an dessen oberen Ende der Strom in das beweglich eingehakte Drahtstück d tritt, dessen unteres Ende in etwas Quecksilber taucht, von wo der Strom wieder abgeleitet wird. Bei Stromschluß kommt das Drahtstück d in dauernde Drehung um den Pol N; Fliehkraft hält es von Berührung des Pols und damit von Reibung ab. Bei Stromumkehr tritt Umkehr der Drehrichtung ein. Die Vorrichtung wirkt, wie man sieht, analog der früher betrachteten, Abb. 25, in welcher Pole um den Stromleiter rotierten, während hier der Stromleiter um den Pol rotiert. Es ist dadurch ersichtlich gemacht, daß es zwei einander entgegengesetzt gerichtete Drehmomente sind, die auftreten. Daß sie entgegengesetzt gleich sind, wie es dem Flächensatz (M 230) entspricht, dies hat sich bei Anwendung der folgenden Kraftberechnung vollkommen bewährt.

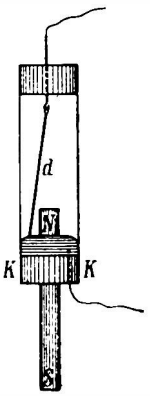


Abb. 50. Um Magnetpol kreisender Stromdraht.

316. Kraft auf einen Stromleiter im Magnetfeld. — Um zunächst die Kraft zu berechnen, welche ein Stromleiter in der Nähe eines Magnetpoles erfährt, kann man sich des Stromelementengesetzes (279) bedienen, indem man die gesuchte Gegenkraft gleich der durch das Gesetz gegebenen Kraft setzt, was bei der Gleichheit der Arme (Abstand Pol — Stromleiter) der Gleichheit der Drehmomente entspricht. Ist (Abb. 51) J J der Stromleiter mit der Stromstärke J und P der Pol von der Stärke m, so ist nach dem Stromelementengesetz die auf den Pol wirkende Kraft, ausgeübt vom Stromelement λ, gleich $Jm(\lambda/r^2)\sin\alpha$; die Richtung der Kraft ist senkrecht zur Ebene von Stromelement und Pol. Ebenso groß und ebenfalls senkrecht zu dieser Ebene, nur von entgegengesetzter Richtung, ist auch die vom Pole auf das Stromelement ausgeübte Kraft. Nehmen wir die Länge dieses Elementes $\lambda = 1$, so erhalten wir die vom Pol auf die Längeneinheit des Leiters ausgeübte Kraft; sie ist somit gleich $J(m/r^2)\sin\alpha$. m/r^2 ist aber nach Coulombs Gesetz die vom Pole m herrührende Feldstärke am Orte des betrachteten Leiterstücks, und $(m/r^2)\sin\alpha$ ist die senkrecht zum Leiterstück gerichtete Komponente dieser Feldstärke.

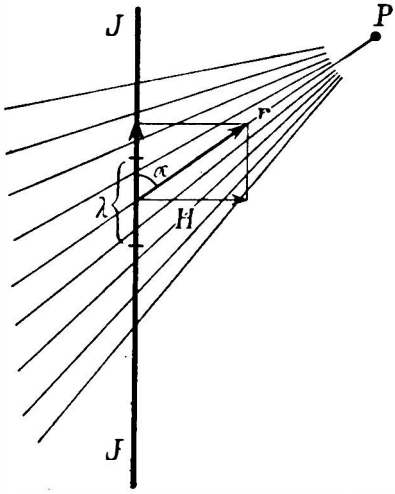


Abb. 51. Stromleiter im Magnetfeld.

Man sieht daraus, daß es für die Kraft, welche der Leiter erfährt, nur auf die am Orte des Leiters vorhandene Magnetfeldstärke ankommt und zwar nur auf deren quer zum Leiter gerichtete

Komponente. Bezeichnen wir diese Komponente mit H, so wird die Kraft auf die Längeneinheit des Leiters gleich $J \cdot H$, Stromstärke mal quer zum Leiter gerichtete Feldstärke. Den benutzten Gesetzen nach wird die Kraft in dyn/cm erhalten, wenn man J und H in elektromagnetischen CGS-Einheiten einsetzt.

Ein im Magnetfeld befindlicher Stromleiter wird demnach die stärkste Kraft erfahren, wenn er senkrecht zu den Kraftlinien des ihn umgebenden Feldes steht, weil dann das volle Feld wirkt; die Richtung der Kraft wird die dritte Senkrechte sein: senkrecht zum Leiter und zu den Kraftlinien. Die Richtung der Kraft wird umgekehrt, wenn die Stromrichtung (Vorzeichen von J) oder die Feldrichtung (Vorzeichen von H) gewendet wird. Ist der Leiter beweglich, so wird er sich also quer durch die Kraftlinien des Feldes bewegen, so daß er sie schneidet. Dies ist auch an den Vorrichtungen Abb. 49 und 50 zu bemerken.

Daß nur das Feld am Orte des Leiters bestimmend ist, einerlei ob es zu dem im Stromelementengesetz zu Hilfe genommenen Pol gehört, so daß die Kraftlinien wie in der Abb. 51 nach P hin konvergieren, oder ob das Feld abseits vom Leiter einen beliebigen anderen Verlauf hat, dies stimmt vollkommen mit allem über Kraftlinien bereits Bemerkten überein, wonach elektrische und magnetische Wirkungen nicht in die Ferne gehen, sondern nur nach dem örtlichen Vorhandensein der Kraftlinien sich richten, was weiterhin noch einen besonderen Nachweis erhält (422).

317. Ein zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten senkrecht zu den Kraftlinien schlaff ausgespannter Draht führt bei Stromschluß die Querbewegung als kleine Zuckung aus; wird er an der Okularskala eines Mikroskops beobachtet, so gibt er ein für gewisse Zwecke sehr vorteilhaftes Galvanometer ab („Saitengalvanometer"). Der Vorteil besteht in der schnellen Einstellung wegen der sehr kleinen zu bewegenden Masse, und somit in der Meßbarkeit auch sehr kurz dauernder Ströme, außerdem im Fortfall aller Drahtwindungen (mit deren manchmal hinderlicher Selbstinduktion).

Wird die elastische Kontrollkraft am beweglichen Leiter durch geeignete Form und Beschaffenheit desselben besonders schwach gemacht („Schleifengalvanometer"), so erreicht man mit Benutzung bester Stahlmagnete in dieser einfachen Weise auch sehr hohe Empfindlichkeiten.

318. Elektrizitätsleitung im Magnetfeld. — Befindet sich ein metallenes Rad mit Speichen, aber ohne Radkranz, so zwischen den Schenkeln eines Magneten, daß bei Drehung des Rades eine Speiche nach der anderen die Kraftlinien quer durchschneidet, so kommt das Rad in Drehung, wenn Strom durch die jeweils im Magnetfeld befindliche Speiche fließt. Der Eintritt des Stromes kann durch die Achse, der Austritt durch einen Quecksilbertropfen stattfinden, den das Ende der betreffenden Speiche berührt. Diese Bewegung des Rades ist nichts Neues, da nach dem Vorherigen (316) die jeweils stromdurchflossene Speiche quer durch das Kraftfeld getrieben wird und da eine Speiche nach der anderen diese Rolle übernimmt. Bemerkenswert ist es aber, daß dieselben Dreherscheinungen auch an einem Rade eintreten, das gar keine Speichen hat, sondern eine einfache Metallscheibe ist. Dies zeigt, daß die Metallatome im ganzen Inneren (vgl. 53) an der Stromleitung wesentlich beteiligt sind. Auch die Wärmewirkungen der Ströme zeigen (221), daß die Metallatome vom Strom in Bewegung gesetzt werden; doch hängt diese ungeordnete Bewegung nicht unmittelbar mit den Ladungen der bewegten Teile zusammen.

Ist das Metall im Magnetfeld festgehalten, so findet man (mittels seitlich am Metall angebrachter, abzweigender Leitungswege) eine seitliche Ablenkung der Strombahn in ihm („Hall-

Effekt"); doch entſpricht dieſe Ablenkung je nach Art des Metalles bald mehr der Bewegung poſitiver, bald mehr der negativer Ladungen im Metall (vgl. 13), und es fehlt gute Kenntnis der hierbei zugrundeliegenden Vorgänge.

Wismut zeigt im Magnetfeld eine Vermehrung ſeines Leitungswiderſtandes, was zur Meſſung von Magnetfeldern benutzt werden kann („Wismutſpirale"); auch dieſe Erſcheinung iſt trotz Kenntnis vieler Einzelheiten noch nicht genügend verſtändlich geworden.

319. Stromſpulen im Magnetfeld. — Iſt der Stromleiter ein Solenoid, eine Spule oder auch nur eine einzelne Windung einer ſolchen, ſo genügt es zur Beurteilung ſeines Verhaltens im Magnetfeld zu wiſſen, daß er dasſelbe Kraftlinienfeld hat wie ein Magnet (303); denn es können nur ſeine Magnetkraftlinien beſtimmend ſein für die auf ihn wirkenden magnetiſchen Kräfte.

Eine beweglich aufgehängte oder unterſtützte Stromſpule wird ſich ſomit in einem Magnetfeld wie eine Magnetnadel einſtellen. Iſt nur das Erdfeld

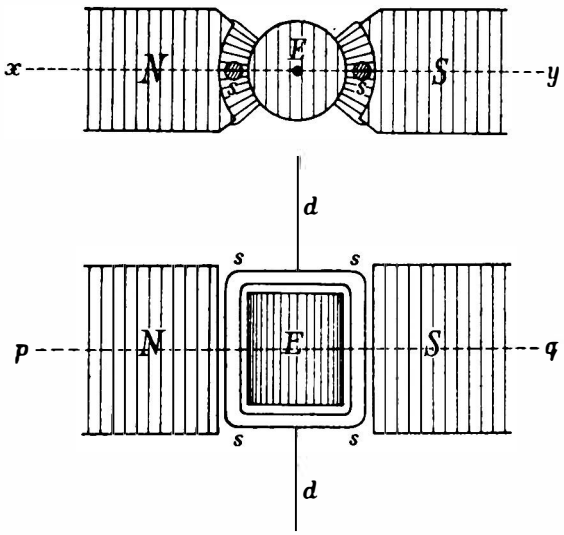


Abb. 52 a. Schnitt nach p q von 52 b.

Abb. 52 b. Schnitt nach x y von 52 a.

Abb. 52 a u. b. Drehſpulgalvanometer.

da, ſo ſtellt ſie ſich mit ihrer Längsrichtung in die Ebene des magnetiſchen Meridians. Auf genäherte Pole von Magneten reagiert ſie ebenfalls wie eine Magnetnadel.

Dieſe Eigenſchaft der Stromſpule wird in den „Drehſpulgalvanometern" zur Strommeſſung benutzt. Es iſt dabei — umgekehrt wie bei den Multiplikatoren (296) — der Magnet feſtſtehend und die Spule beweglich.

Zu- und Ableitung des zu meſſenden Stroms können im einfachſten Fall durch ausgeſpannte Drähte d d erfolgen, welche die Spule s s halten (Abb. 52 b), zugleich Drehachſe ſind und auch die nötige Kontrollkraft liefern. Stromlos muß die Windungsebene der (leichten, dünndrahtigen) Spule vermöge der Kontrollkraft parallel den Kraftlinien des feſten Magneten ſtehen, eines guten permanenten Hufeiſenmagneten, von welchem die Abb. 52a und b nur die Polenden N S zeigen. Strom allein, ohne Kontrollkraft, würde die Windungsebene ſenkrecht zu den Kraftlinien ſtellen, alſo die Spule um 90° drehen. Je nach der Stromſtärke ſtellt ſich vermöge der Kontrollkraft eine Mittellage ein, die mittels Spiegels oder Zeigers abgeleſen werden kann und Anzeige der Stromſtärke iſt. Die Zeigerablenkung fällt genau proportional der Stromſtärke aus, wenn die Spule in allen ihren Stellungen, bei Bewegung über die ganze Skale hin, die Kraftlinien in gleich günſtiger Weiſe, nämlich ſenkrecht (316) durchſchneidet. Dies wird

erreicht durch den zwischen den Polen befestigten, aber die Spule frei lassenden Zylinder E aus weichem Eisen, der die Kraftlinien überall radial gegen die Achse der Spule hin lenkt, wie es Abb. 52a zeigt. Diese Galvanometer haben gegenüber den Multiplikatoren (296) den großen Vorzug der Störungsfreiheit gegen äußere Magnetfelder, von denen sie wegen der Stärke des Feldes ihres eigenen Magneten nahezu unabhängig sind[1]), und sie können auch zu höchsten Empfindlichkeiten (vgl. 296) gebracht werden. Alle feineren Schalttafelinstrumente, Webermesser wie Voltmesser, sind von dieser Art; man erkennt sie, zum Unterschied von den Weicheiseninstrumenten (305), an der über das ganze Meßbereich gleichmäßigen Skaleneinteilung.

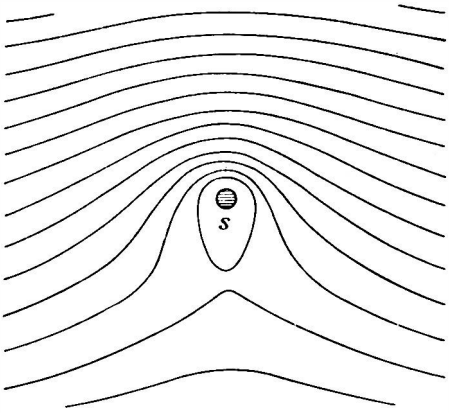


Abb. 53. Strom in homogenem Magnetfeld.

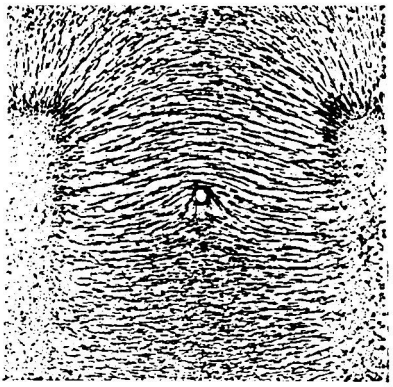


Abb. 54. Strom in homogenem Magnetfeld.

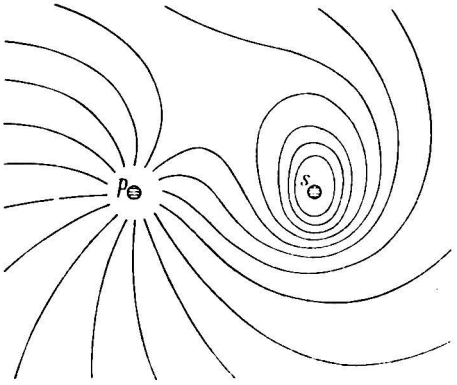


Abb. 55. Pol und Strom.

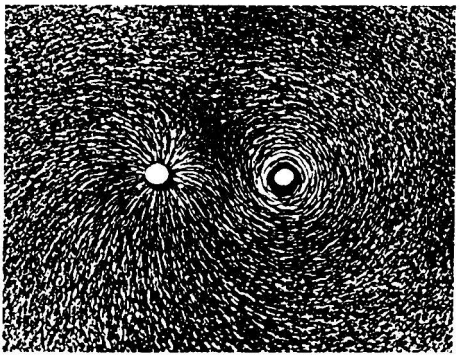


Abb. 56. Pol und Strom.

320. Kraftlinien des Stromes im Magnetfeld. Kräfte und Gegenkräfte im selben Raumelement. — Die oben abgeleitete Regel (316), daß ein Strom im Magnetfeld stets quer zu seiner eigenen Richtung und zu der der Feldkraftlinien getrieben wird, ist stets wertvoll durch ihre Einfachheit, und wir haben auch erwiesen, daß die Kraft, welche der Strom erfährt, entgegengesetzt gleich ist der Kraft auf den Magneten, welcher das Feld liefert (314 u. f.). In Wirklichkeit ist aber eine solche besondere Regel gar nicht erforder-

[1]) Dies trifft auch für die Saiten- und Schleifengalvanometer (317) zu.

lich, wenn man das Kraftfeld beachtet, welches der Strom und der Magnet zusammen ergeben, welches tatsächlich vorhanden ist und welches somit alle Wirkungen aus den Kraftlinieneigenschaften ohne weiteres ergeben muß. Außerdem wird dabei klar, daß dem Gesetz der Gleichheit von Kraft und Gegenkraft sogar in der allereinfachsten Weise genügt wird, indem nämlich sowohl Kraft als Gegenkraft an jeder Stelle des Feldes mit dicht benachbarten Angriffspunkten vorhanden sind (vgl. M 209).

Dieses dem Strom und dem Magneten zusammen zugehörige Feld kann aus den beiden Einzelfeldern stets nach dem Kräfteparallelogrammsatz konstruiert werden (vgl. 282), wobei die Einzelfelder an jeder Stelle die Komponenten angeben, deren Resultierende dann das Gesamtfeld bestimmen. In dieser Weise ist in Abb. 53 die Darstellung des Feldes eines Stromleiters im homogenen Magnetfeld gewonnen. Der Leiter s steht senkrecht zur Zeichnungsebene; die Polschuhe des Magnetfeldes liegen rechts und links außerhalb des Bildes. Abb. 54 zeigt mit Eisenfeile das Zutreffen des konstruierten Kraftlinienlaufes. Ebenso stellen Abb. 55 und 56 die Kraftlinien eines Stromleiters s mit daneben befindlichem Magnetpol p dar. Die dichtest beieinander stehenden Kraftlinien nächst dem Stromleiter sind in den Zeichnungen weggelassen.

Man sieht, daß die allgemeinen Eigenschaften der Kraftlinien, ihr Zug und ihr Drängen (248), ohne weiteres in Abb. 53 die auf den Stromleiter s (nach unten) wirkende Kraft, sowie in Abb. 55 die Drehung von s und p umeinander (im entgegengesetzten Uhrzeigersinn) angeben.

Da sowohl der Zug als das Drängen der Kraftlinien Kräfte bedeuten, die ihre Gegenkräfte überall im gleichen Raumelement angreifend haben, ganz wie es bei elastischen Kräften der Fall ist, so ist die Gültigkeit des Satzes von der Gleichheit der Kraft und Gegenkraft unmittelbar ersichtlich. Beide Kräfte greifen überall an Massen an, seien es die im Felde verteilten Energiemassen (436) der Kraftlinien (273) oder die Massen der mit den Kraftlinien verbundenen Körper. Das Feld mit seinen Kraftlinien verhält sich dabei, Kräfte übertragend, ganz nach Art eines elastischen Körpers. So wird beispielsweise in Abb. 53 die Gegenkraft zu der auf den Stromleiter s wirkenden Kraft übertragen auf die Polschuhe, an denen die Magnetkraftlinien sitzen; während s nach abwärts getrieben ist, erfahren die Polschuhe die gleiche Kraft nach aufwärts. Das Feld ist in der Tat auch insofern gleich einem elastischen Körper, als es, wie dieser, eine räumliche Energieverteilung ist, wenn auch von viel geringerer Dichte.

Ganz anders als die elektrischen, magnetischen und elastischen Kräfte wirkt die Gravitation, bei welcher zwar auch Kräfte und Gegenkräfte von gleicher Größe und entgegengesetzter Richtung sind, jedoch nicht im selben Raumelement angreifend. Es sind oft sehr weit voneinander entfernte Stellen, an welchen Kraft und Gegenkraft angreifen, ohne daß eine Vermittlung von Raumelement zu Raumelement verfolgbar geworden wäre (vgl. M 214).

Ströme und Ströme.

321. Ströme in parallelen Leitern. — Nach Örsteds Entdeckung wußte man, daß Ströme auf Magnete wirken, also magnetische Kräfte ausüben. Danach war zu denken, daß auch Ströme aufeinander Kräfte ausüben könnten, wie Magnete aufeinander wirken. Ampère, der zuerst diesen Gedanken

aßte, wies das tatsächliche Statthaben solcher Kraftwirkungen von Strömen auf
ströme in einfacher Weise nach, indem er einen, etwa zu einem Viereck gebogenen
stromleiter s_1 (Abb. 57) durch Aufhängung auf Spitzen in zwei senkrecht über-
einander befindlichen Quecksilbernäpfchen q beweglich machte und ihm einen
weiten Stromleiter s_2 näherte. Hatten die in Nachbarschaft kommenden Teile
der Leiter gleichgerichtete Ströme,
wie es die Pfeile der Abbildung an-
deuten, so erfolgte Anziehung dieser
Teile; im Falle entgegengerichteter
Ströme erfolgte Abstoßung. Damit
war eine nach damaliger Vorstellung
neue Kraftart entdeckt — Kraft von
Strom auf Strom —: Gleichge-
richtete Ströme in parallelen
Drähten ziehen einander an;
entgegengesetzt gerichtete
Ströme stoßen einander ab.

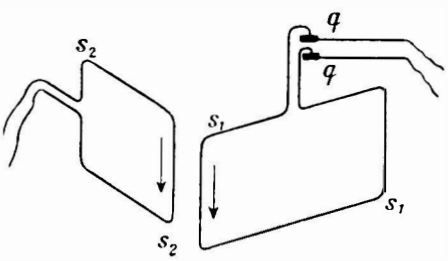


Abb. 57. Strom auf Strom wirkend.

322. Fernkraftgesetze versagen. — Ganz allgemein war danach für
jedes Paar beliebig geformter, beliebig zueinander gelagerter Stromleiter eine
gegenseitige Kraftwirkung zu erwarten, und es war nach einem Gesetz zu suchen,
as Größe und Richtung der Kraft bestimme. Wieder — wie bei den Kräften
der Ströme auf Magnetpole — schien der
Weg gegeben, „Stromelemente" anzunehmen
(279), d. h. die Leiter zerstückelt zu denken
und die Kräfte der ganzen Leiter als Resul-
tierende der Einzelkräfte sämtlicher aufein-
ander wirkender Leiterstücke — Stromele-
mente — zu betrachten. Das Gesetz solcher
Kräfte von Stromelementen aufeinander
konnte nicht zurückgeführt werden auf die
schon bekannten Gesetze elektrischer und
magnetischer Kräfte. Es sind das die beiden
Gesetze von Coulomb für ruhende Elektrizitäten
und für ruhende Magnetpole und das Strom-
elementengesetz für dauernd gleichmäßig
fließende Ströme und Magnetpole (vgl. die
Zusammenstellung in Abb. 58). Keines dieser
drei Gesetze gibt Anhalt dafür, wie zwei
Stromelemente aufeinander wirken sollten;
denn der Pol im dritten Gesetz ist in keiner
Weise durch ein Stromelement ersetzbar,

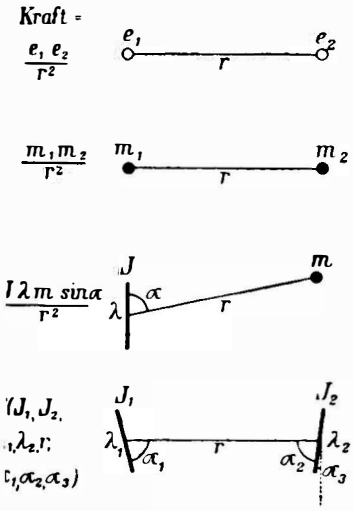


Abb. 58. Elektrisch-magnetische Fern-
kraftgesetze.

ie überhaupt die drei behandelten Dinge —: ruhende Elektrizitätsmenge,
ol, Stromelement — gänzlich voneinander verschieden sind. Daher erschien
ich die von Ampère entdeckte Kraft von Strömen auf Strömen ganz
euartig, und es mußte das gesuchte Gesetz als etwas Neues aus beobachteten
esamtwirkungen verschieden geformter Stromleiter aufeinander abgeleitet
erden, ganz wie beim Stromelementengesetz verfahren wurde (280). Diese

Ableitung gelang aber nicht eindeutig, wie überhaupt Summanden aus einer gegebenen Summe nicht ohne weiteres eindeutig abgeleitet werden können. Es ergaben sich mehrere mögliche Annahmen für das Gesetz einer in der Verbindungslinie zweier Stromelemente wirkenden Kraft, die sämtlich den beobachteten Kräften ganzer Stromleiter gleich gut genügten. Verwunderlich ist diese Unbestimmtheit schon deshalb nicht, weil nicht weniger als 8 Bestimmungsstücke für die Kraft maßgebend sein mußten (dieselben sind in Abb. 58 unten verzeichnet, dabei die 3 Winkel α_1, α_2, α_3, welche die Lage der beiden Stromelemente gegeneinander und zur Verbindungslinie angeben), so daß das Gesetz nicht wenig verwickelt sein konnte. Die Unbestimmtheit war nicht zu beseitigen, weil gründliches Vorgehen auf dem eingeschlagenen Wege unmöglich war, unmöglich nämlich die Herstellung von Stromelementen mit gleichbleibender Stromstärke, um deren Kräfte zu messen. Es rächte sich hier der Gedankenversuch der Zerstückelung von Stromleitern ohne Vernichtung des Stromes, der immer unerlaubt, naturwidrig war, weil er in gar keiner Annäherung verwirklicht werden kann (vgl. M 86).

Wir dürfen daher auf die Angabe der Gesetzesformen (d. i. der Funktionen f in Abb. 58), auf die man für die Kräfte zwischen Stromelementen kam, hier verzichten. Es ist aber auch noch ein zweiter Grund für diese Beiseitelassung vorhanden, und dies ist der als unrichtig erwiesene Fernkraft-Gedanke, der übrigens allen in der Abb. 58 zusammengefaßten Gesetzen zugrundeliegt. Diese Gesetze nehmen an, oder nahmen ursprünglich an, daß mit den gegebenen Bestimmungsstücken (Elektrizitätsmengen, Polstärken usw.) und dem Abstand r stets die vom Gesetz angegebene Kraft und Gegenkraft an den Enden dieses Abstandes vorhanden sei, unabhängig von der Ausfüllung des Zwischenraumes und vor allem auch sofort, ohne Verspätung. Diese Uneingeschränktheit trifft nicht zu, was wir, die Raumerfüllung betreffend, teils schon sahen (107, 108, 253) und was später weiter noch umfassender sich zeigt (422). Dies liefert die Begrenzung der Gültigkeit, welche wir beim Stromelementengesetz schon angegeben haben (281). Innerhalb dieser Grenzen, nämlich für zeitlich unveränderliche Ladungen, Pole, Ströme, und im materiefreien Raum, haben diese Gesetze Wahrheitswert; sie stellen Naturerkenntnisse dar, und wenn sie einfache Form haben, wie bei den beiden Coulombschen Gesetzen, besitzen sie auch Naturanschauungswert. Wenn aber bei eingeschränkter Gültigkeit auch noch die Form verwickelt, ja unbestimmt wird, wie bei dem Kraftgesetz zwischen Stromelementen, so geht dieser Wert verloren und es bleibt nur der Wert eines Rechenhilfsmittels übrig, noch dazu von beschränkter Anwendbarkeit. Dieses ärmliche Ergebnis vieler Bemühungen, besonders aus der Zeit Wilhelm Webers, war, wie schon hervorgehoben, durch die Einführung der wirklichkeitswidrigen Stromelemente verschuldet (281).

323. Unmittelbare Einsicht durch die Kraftlinien. — Ein besserer Weg als der über die Stromelemente wurde durch Faradays Kraftlinien eröffnet. Wir haben dieselben mit ihren Eigenschaften schon anstelle der beiden Coulombschen Gesetze und des Stromelementengesetzes eingeführt und die uneingeschränkte Gültigkeit hervorgehoben (58 u. f., 236 u. f., 281). Es ist eine besondere Folge des Wahrheits-Wertes — und bei der vorhandenen Einfachheit auch des Naturanschauungs-Wertes — der Kenntnisse von den Kraftlinien, daß sie gerade in dem nach Vorerwähntem fast hoffnungslosen Falle der Kräfte zwischen Strömen nicht nur ohne Schwierigkeit, sondern sogar ganz ohne weiteres alle wünschenswerten Auskünfte geben.

Man sehe die Kraftlinien der zwei gleichgerichteten Ströme (Abb. 28, 29), und es ist unmittelbar klar, daß sie einander anziehen vermöge des Zuges der sie gemeinsam umschließenden Kraftlinien. Ebenso ist klar, daß die entgegengerichteten Ströme (Abb. 30, 31) einander abstoßen vermöge des Drängens der

zwischen ihnen laufenden Kraftlinien. Diese Kräfte von Strömen auf Ströme sind hiernach, sobald man die Kraftlinien und ihre Eigenschaften kennt, sogar gar nichts Neues.

Überhaupt fassen die Kraftlinien alle die in Abb. 58 zusammengestellten, scheinbar nicht aufeinander zurückführbaren Kraftarten zusammen als gleichmäßig durch elektrische und magnetische Kraftlinien bewirkt. Alle elektrischen und magnetischen Kräfte an irgendeiner Stelle des Raumes sind dabei immer nur bestimmt durch die an dieser Raumstelle vorhandenen Kraftlinien (vgl. 316); elektrische und magnetische „Fernkräfte" sind nicht vorhanden.

Der das Gesamtbild noch weiter vereinheitlichende Zusammenhang der beiden Kraftlinienarten — der elektrischen und der magnetischen — miteinander wird alsbald zu behandeln sein (328 u. f.).

324. Will man die Größe der Kraft zweier paralleler, langer, geradliniger Stromleiter aufeinander berechnen, so bedient man sich am einfachsten der allgemeinen Regel, welche die Kräfte auf Stromleiter in gegebenem Magnetfeld angibt (316). Das gegebene Magnetfeld ist in diesem Falle das Feld des einen Stromleiters, das bei großer Länge desselben sehr einfach beschaffen ist (277, Abb. 22); die gesuchte Kraft auf den anderen Stromleiter ist dann quer zu ihm und zum Feld, somit in der kürzesten Verbindungslinie der beiden Leiter gerichtet, wie es Ampères Beobachtung entspricht. Die Größe der Kraft in Abhängigkeit von den beiden Stromstärken J_1 und J_2, vom Abstand r zwischen den Leitern und von der Länge l des betrachteten Leiterstücks ergibt sich zu $2\,J_1 J_2 l/r$ in absoluten elektromagnetischen CGS-Einheiten (vgl. 280). Daß die so berechnete Kraft mit der Wirklichkeit übereinstimmt, dies zeigt wieder, daß nur das am Orte vorhandene Feld bestimmend ist für die Kraft, gleichgültig ob es in der Ferne etwa an einem Pol oder — wie hier — an einem Strom sitzt.

325. Parallele Kreisströme zeigen ebenfalls Anziehung oder Abstoßung, je nach der gegenseitigen Stromrichtung. Man kann das an beweglich auf ihren Zuleitungen hängenden Bündeln von Kreisströmen, a und b in Abb. 59, sehen.

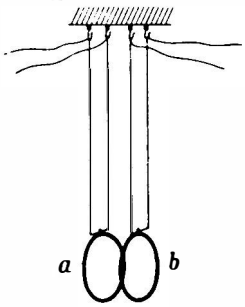


Abb. 59. Stromspulen aufeinander wirkend.

Die Kräfte können hier und besonders bei Stromspulen nach der Gleichheit der Magnetfelder mit denen von Magnetstäben beurteilt werden (303). Sind die Ströme gleichgerichtet, so liegen entgegengesetzte Pole einander gegenüber, daher die Anziehung; sind die Ströme einander entgegengesetzt gerichtet, so sind es gleiche Pole und daher die Abstoßung.

Die Kräfte paralleler Kreisströme werden in der „Stromwaage" zur Strommessung benutzt. Ein Waagebalken trägt an seinen Enden je eine kreisförmige Spule mit horizontaler Fläche, und ober- und unterhalb jeder dieser beiden beweglichen Spulen sind ihnen gleiche, feste Spulen parallel angebracht. Der zu messende Strom geht durch alle sechs Spulen, so daß die dann auf den Waagebalken wirkenden vier Kräfte ein einheitliches Drehmoment ergeben, welchem durch Gewichte (etwa ein Laufgewicht am Waagebalken) das Gleichgewicht gehalten werden kann. Man kann so nach Eichung mittels Voltameters Ströme durch Wägung messen. Die Unveränderlichkeit der hier als Kontrollkraft benutzten Schwerkraft im Vergleich zu den leicht veränderlichen elastischen Kräften anderer Strommesser ist ein Vorteil des Instruments; doch muß die Eichung je nach geographischer Breite und Meereshöhe umgerechnet werden (vgl. M 210).

326. Auch innerhalb einer einzelnen Stromspule treten Kräfte auf. Benachbarte Windungen tragen gleichgerichtete Ströme, ziehen also einander an. Dies wird an der federnden Spule, Abb. 60, auffallend, indem dieselbe bei

Stromſchluß ſich verkürzt, ſo daß ihr unteres Ende aus dem Queckſilbernapf kommt, was den Strom unterbricht. Dies hat aber Zurückſinken der Spule und ſomit erneuten Stromſchluß mit Wiederholung des Vorgangs zur Folge, ſo daß die Spule fortdauernd als ſelbſttätiger Stromunterbrecher wirkt.

Solche Verkürzung einer Stromſpule iſt aus ihrem Kraftfeld (Abb. 37) unmittelbar als Folge des Zuges der Kraftlinien zu erwarten. Außerdem muß aber das Drängen der Kraftlinien im Spuleninneren eine Erweiterung der Spule zur Folge haben.

Auch auf jeden einfachen Stromleiter wirken Zug und Drängen ſeiner Magnetkraftlinien. Der Zug ſucht den Stromweg, den die Kraftlinien umſchließen, abzuſchnüren. Man kann dies an einem Queckſilberfaden beobachten, der in einer (langen, Queckſilberabfluß geſtattenden) Rinne liegend als Stromleiter dient; er wird dünner, wenn der Strom genügend ſtark iſt, was bis zur Stromunterbrechung durch vollſtändiges Abſchnüren des Fadens gehen kann.

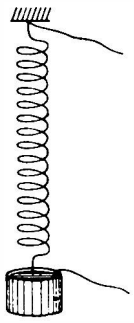


Abb. 60.
Hüpfende Spule.

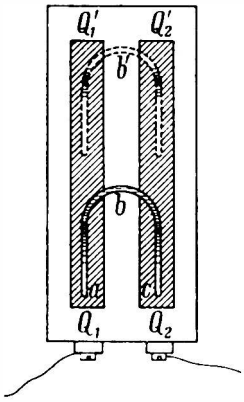


Abb. 61.
Schwimmender Bügel.

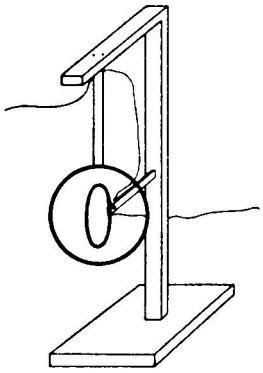


Abb. 62.
Elektro-Dynamometer.

Die den Stromkreis ausweitende Wirkung des Drängens der Kraftlinien kann an der Vorrichtung Abb. 61 (ſchräg von oben geſehen) gezeigt werden. Es ſchwimmt hier ein Kupferbügel a b c auf dem in den beiden Rinnen Q_1Q_1' und Q_2Q_2' befindlichen Queckſilber. Bei Q_1 eintretender Strom gelangt über den Bogen b des Bügels in die andere Rinne und tritt bei Q_2 wieder aus. Der Bügel läuft bei Stromſchluß voran in die punktierte Lage, von b nach b', entſprechend der dabei eintretenden Erweiterung des Raumes für die Kraftlinien des Stromes[1]).

327. Daß Stromſpulen auch Drehmomente aufeinander ausüben, wie Stahlmagnete bekannten magnetiſchen Moments (303), iſt nach der Beſchaffenheit ihrer Felder ſelbſtverſtändlich. Zwei Kreisſtrombündel oder Spulen mit gemeinſamem Mittelpunkt, aber rechtwinklig zueinander ſtehenden Ebenen, Abb. 62, geben das Elektrodynamometer (Wilhelm Weber, 1846), wieder ein Strommeßmittel. Der Strom durchſetzt beide Spulen; die eine iſt feſt, die andere mit beweglichen Zuleitungen um die vertikale Achſe drehbar. Bei Stromſchluß erfolgt Drehung dieſer Spule im Sinne des Gleichlaufens beider Ströme. Es iſt hier die Nadel des gewöhnlichen Galvanometers durch die bewegliche Spule erſetzt. Kontrollkraft iſt bei der „bifilaren" Aufhängung, wie in der Abbildung, die Schwerkraft, ſonſt eine elaſtiſche Kraft. Die Ablenkung erfolgt immer nur nach derſelben Seite, auch wenn man den Strom wendet, weil dann beide Spulen ihre Pole wechſeln. Hierdurch iſt das Inſtrument beſonders zur Meſſung von Wechſelſtrömen geeignet, deren ſchnell hin- und hergehenden Kräften ein Nadelgalvanometer oder Drehſpulgalvanometer nicht folgen kann. Daß die Ablenkungen proportional dem Quadrat der Stromſtärke ſein müſſen, iſt leicht einzuſehen.

[1]) Die Vorrichtung war urſprünglich in der Abſicht erdacht, etwas über die Kräfte von Stromelementen auf Stromelemente (desſelben Stromes) zu erfahren.

2. Der elektrodynamische Zusammenhang.

328. *Magnetische Kraftlinien entstehen bei Bewegung elektrischer Kraftlinien.* — Zweierlei Kraftlinien zusammengenommen — die elektrischen und die magnetischen — haben, wie wir sahen, ein umfassendes Verstehen der Erscheinungen der ruhenden und der bewegten Elektrizität und des Magnetismus erlaubt (58 u. f., 236 u. f., 277 u. f.). Beide Kraftlinienarten zeigten sich als Energieverteilungen im Äther (122 u. f., 273 u. f.), verwandt miteinander, aber doch voneinander verschieden in ihrer Beschaffenheit (255). Dabei war es im Bisherigen nicht nötig, auf einen *Zusammenhang der beiden Kraftlinienarten* einzugehen; es genügte, sie gesondert und wie unabhängig voneinander zu betrachten. Es besteht aber, wie bereits bemerkt (298), ein Zusammenhang, der nun eingehend untersucht werden soll. Seine Erkenntnis vereinfacht das Verstehen des Vorangegangenen, und es zeigt sich in allem Folgenden, daß auch noch viel Weiteres dabei umfaßt wird.

Der Zusammenhang wird ersichtlich aus der Bemerkung, daß — soweit irgend bekannt — *magnetische Kraftlinien nicht anders auftreten als nur durch bewegte Elektrizität.* Aller Magnetismus, sei er an Stahl oder sonstigen Stoffen oder an elektrischen Strömen mit oder ohne Eisenkernen, ist als Folge von Elektrizitätsbewegung erkannt, wobei besonders an die Erfahrungen mit mechanisch bewegten Ladungen (297) und an die nicht zu bezweifelnden Elektrizitätsbewegungen in den Atomen der Elementarmagnete aller Stoffe (304) zu erinnern ist. Mit den Elektrizitäten sind auch die von ihnen unzertrennlichen (74) elektrischen Kraftlinien bewegt; es entstehen daher die *magnetischen Kraftlinien als Ergebnis der Bewegung von elektrischen Kraftlinien*, und zwar haben wir bereits gezeigt (298), daß es dabei auf Bewegungen relativ zum Äther des Ortes ankommt. *Relativ zum Äther* sind dementsprechend auch *alle im folgenden zu betrachtenden Kraftlinienbewegungen gemeint.*

Als das ursprünglich Gegebene können daher die beiden Elektrizitäten mit den sie verbindenden elektrischen Kraftlinien erscheinen. Sie sind in den Atomen der Materie vorrätig und können unter beliebiger Verlängerung ihrer Kraftlinien herausgeholt werden (77, 526). Magnetkraftlinien kommen dazu, wenn elektrische Kraftlinien in Bewegung sind.

329. *Modell des elektrodynamischen Zusammenhangs.* — *Das Wesentliche* für die Entstehung magnetischer Kraftlinien durch elektrische ist am einfachen Fall eines geradlinigen Stromes zu ersehen, der durch Fortbewegung elektrischer Ladung entsteht. Folgendes ist nach den ausgeführten Versuchen (297) ein erlaubter Gedankenversuch: Es sei eine gerade Linie gleichförmig mit positiver Elektrizität beladen, und sie sei in ihrer eigenen Richtung fortbewegt. Sie stellt dann einen in dieser Richtung fließenden Strom dar und übt nach Erfahrung auch die ihm zugehörigen magnetischen Kräfte aus. Die zur Ladung der Linie gehörenden elektrischen Kraftlinien stehen dabei überall senkrecht zur Linie; sie sind also *quer zu ihrer eigenen Richtung* bewegt. Die magnetischen Kraftlinien gehen im Kreise um die Linie herum; sie stehen also überall senkrecht zu den elektrischen Kraftlinien und zur Bewegungsrichtung derselben. Diese *drei aufeinander Senkrechten* sind das Wesentliche: Elektrische Kraftlinie, Bewegungsrichtung derselben, magnetische Kraftlinie. Abb. 63 stellt diese drei Richtungen dar.

Das Ergebnis ist allgemeingültig: So oft eine elektrische Kraftlinie quer zu ihrer Richtung bewegt ist, ist magnetische Kraft quer zu beiden Richtungen — in Richtung der dritten Senkrechten — vorhanden, wie es die Abbildung zeigt, und dies kann als die alleinige Entstehungsweise magnetischer Kraftlinien angesehen werden (328). Die Auswahl des zur Ableitung benutzten Sonderfalles bedeutet keine Einschränkung, wie alles Folgende zeigt. Es ist hier auch wieder bewährt, wie schon öfter gesehen (316, 324), daß für die an einer Stelle des Feldes stattfindenden Vorgänge nur die dort befindlichen Kraftlinien maßgebend sind, unabhängig von dem, was gleichzeitig an andern Stellen geschieht.

Wir nennen das in der Abb. 63 dargestellte Ergebnis den „elektrodynamischen Zusammenhang" (der elektrischen und magnetischen Kräfte).

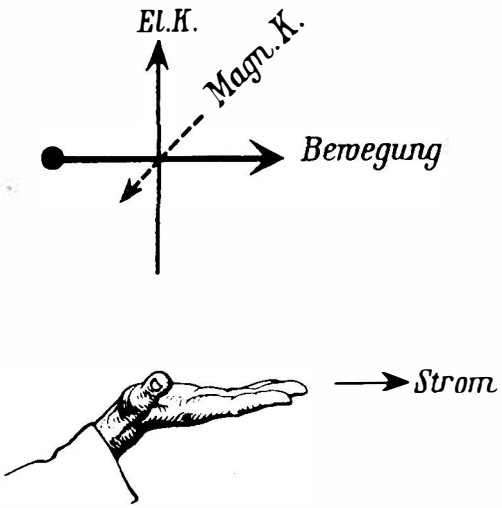


Abb. 63. Der elektrodynamische Zusammenhang.
(Pfeil der magnet. Kraft und Daumen der Hand zeigen beide nach vorn.)

Alle drei Richtungen, wie sie Abb. 63 durch die Pfeile angibt, sind eindeutig festliegend; keine der Richtungen könnte für sich allein umgekehrt werden ohne Naturwidriges zu ergeben (vgl. 369).

Man kann die naturgegebenen, richtigen Pfeilstellungen des Modells jederzeit aus der leicht zu behaltenden Handregel für die magnetische Stromkraft (276) herleiten, die im Modell einbegriffen ist. Es ist dazu die rechte Hand mit ausgestrecktem Daumen in der Abb. 63 unten hinzugefügt. Man denke die Hand als Stromleiter, in welchem positive Elektrizität in Richtung der Fingerspitzen sich bewegt, wie es zur Handregel gehört, und es werde ein Punkt oberhalb dieses Stromes untersucht, wo in der Abbildung das Modell sich befindet und wohin die Handfläche richtig gerichtet ist. Die elektrische Kraft ist dort nach oben gerichtet, weil positive Elektrizität dorthin von der gleichnamigen des Stromes abgestoßen würde; der Pfeil der elektrischen Kraft steht also richtig. Der Bewegungspfeil steht auch richtig, weil die elektrische Kraftlinie mit der Elektrizität des Leiters, an welcher sie endet, fortbewegt ist. Die Richtung der magnetischen Kraft, nach vorn gehend, stimmt mit der des Daumens überein, ist also ebenfalls richtig.

Man kann das Modell mit den drei fest verbundenen Pfeilen, etwa aus verlöteten Metallstäben gebildet, beliebig bewegen und wenden; es bleibt für alle

Fälle richtig und hält die Kenntnis vom elektrodynamischen Zusammenhang für alle Fälle gebrauchsfertig fest. Wir werden es im noch folgenden oft anzuwenden haben. Es stellt ein Stück Naturerkenntnis dar, festgehalten mittels der Begriffe der beiden Kräfte und der Geschwindigkeit.

Man kann merken: Richtung der Bewegung im Modell ist die, nach welcher eine gewöhnliche Schraubenspindel fortschreiten würde, wenn man sie von der Richtung der elektrischen Kraft nach die der magnetischen Kraft hin drehte.

Es sei erwähnt, daß die Analogie der elektrischen Kraftlinien mit Wirbelfäden und der magnetischen Kraftlinien mit Strömungslinien (129, 256), auch hier, im elektrodynamischen Zusammenhang noch Fortgeltung findet. Es gilt nämlich für Gase und Flüssigkeiten und ist in Gasen leicht durch Beobachtung nachzuweisen, daß ein quer zu seiner Richtung fortbewegter Wirbelfaden eine Strömung hervorbringt, die in der dritten Senkrechten, quer zu ihm und zu seiner Bewegungsrichtung verläuft. Daß die Analogie nicht viel weiter geht, haben wir schon bemerkt (129).

330. Energiewanderung. — Da elektrische und magnetische Kraftlinien Energieverteilungen bedeuten (328), wandert bei Bewegung dieser Kraftlinien auch die Energie im Raum. Damit ergibt sich aus dem elektrodynamischen Zusammenhang die Regel für die Energiewanderung: daß sie stets in Richtung senkrecht zur Ebene der elektrischen und dazugehörigen magnetischen Kraft erfolgt[1]).

Sind in einem bestimmten Falle die beiden Kräfte bekannt, so kann danach die Richtung der Energiewanderung angegeben werden.

Wir betrachten als Beispiel den gewöhnlichen elektrischen Strom im Vergleiche zum Strom mechanisch fortbewegter Elektrizität des vorigen Gedankenversuchs (329). Hier, beim gewöhnlichen Strom, stehen die elektrischen Kraftlinien nicht senkrecht zum Leiter, sondern mehr oder weniger schief; denn hier wird die Elektrizität nicht mechanisch, sondern durch die elektrische (elektromotorische) Kraft der Stromquelle fortbewegt, wozu nach Ohms Gesetz eine tangentiale Komponente der elektrischen Kraft an der Leiteroberfläche nötig ist, wie schon früher erläutert (161, 162). Diese tangentiale Komponente ergibt das Schiefstehen der Gesamtkraft. Wenn aber die elektrischen Kraftlinien schief zur Leiteroberfläche stehen, während die magnetischen parallel zu derselben, quer zum Strom, gerichtet sind — wie es tatsächlich der Fall ist (278) —, so muß die Richtung der Energiewanderung nach dem elektrodynamischen Zusammenhang ebenfalls schief zur Leiteroberfläche stehen, und zwar ergibt sie sich gegen diese Oberfläche hin gerichtet. Die Energie des gewöhnlichen Stromes wandert also in der Nähe der Leiteroberfläche nicht parallel zu derselben — also zum Strome — weiter, sondern sie wandert aus dem Felde um den Leiter mehr oder weniger — je nach seinem Widerstand — in ihn hinein. Diese für die Fortleitung verlorene Energie erscheint im Leiter als die bekannte Stromwärme (212).

331. Quantitativ kann man zum elektrodynamischen Zusammenhang die Frage stellen, wie groß die magnetische Kraft bei gegebener Fortbewegungsgeschwindigkeit gegebener elektrischer Kraftlinien ausfällt. Die Frage ist aus dem Gedankenversuch des Stromes einer fortbewegten geladenen Geraden, von dem wir ausgingen (329), leicht zu beantworten. Wir werden dabei die elektrische Kraft im elektrostatischen, die magnetische im elektromagnetischen

[1]) Siehe dazu Anhang E V c, wo der Gegenstand nach Maxwells Gleichungen und in vollem Zusammenhang mit allem Bekannten behandelt wird.

CGS-System (264) gemessen annehmen, was ebenso zweckmäßig, als für alle grundlegenden Überlegungen naturgemäß ist, weil so beide Kräfte unmittelbar nach ihren Definitionen gemessen werden, wobei sie auch gleiche Dimension (291) erhalten.

Es sei auf der Längeneinheit der Stromlinie die positive Elektrizitätsmenge e vorhanden und mit der Geschwindigkeit v relativ zum Äther des Ortes (298, 328) bewegt. Das elektrische Feld im Abstand R von der Linie ist dann $E = 4\pi e/2R\pi = 2e/R$, weil von der elektrostatischen Mengeneinheit 4π Kraftlinien ausgehen (74), die hier, überall senkrecht zur Linie laufend, auf die Fläche $2R\pi$ sich verteilen. Der Strom ist $e \cdot v$ (151) in elektrostatischem Maß, daher — nach dem Einheitsverhältnis (300) — in elektromagnetischem Maß $J = ev/c$, und sein Magnetfeld im Abstand R ist (280) $H = 2J/R = 2ev/Rc$. Elimination von e aus den Gleichungen für E und H gibt die gesuchte Beziehung

$$H = E\,v/c\,, \qquad 331)$$

gültig für alle Abstände und auch unabhängig vom zuhilfe genommenen Strom, da e und R zusammen herausfielen.

Wenn also ein elektrisches Feld E quer zu seinen Kraftlinien mit der Geschwindigkeit v relativ zum Äther des Ortes bewegt ist, erzeugt es stets das Magnetfeld $H = Ev/c$ mit der durch den elektrodynamischen Zusammenhang gegebenen Richtung.

Mit wachsendem elektrischen Feld E und wachsender Geschwindigkeit v steigt nach Gl. 331 das Magnetfeld. Bei Lichtgeschwindigkeit, $v = c$, wird $H = E$, das elektromagnetisch gemessene Magnetfeld gleich dem elektrostatisch gemessenen elektrischen Feld. Spätere Erfahrung zeigt (420), daß dieser Fall vorliegt, wenn elektrische Kraftlinien infolge ihres seitlichen Drängens frei sich ausbreiten; sie tun dies mit Lichtgeschwindigkeit (417 u. f.), und auch bei ihrem Gleiten längs Leitern können sie nahe diese Geschwindigkeit annehmen (126)[1]). Für jetzt sei nur auf die Ausbreitung der Lichtwellen hingewiesen. Wir hatten, um die Optik sogleich im Zusammenhang mit aller Kenntnis behandeln zu können, bereits dort den Lichtstrahl als ein Beispiel der Energieausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit eingeführt (O 3). Man sieht am Lichtstrahl (Abb. 1, Bd. III, gleich Abb. 94, 2. Zeile in diesem Bande) die Geltung des elektrodynamischen Zusammenhangs an den drei aufeinander senkrechten Richtungen der elektrischen Kraft, der magnetischen Kraft und des Energielaufes (Strahlrichtung).

332. Elektrische Kraftlinien entstehend bei Bewegung magnetischer Kraftlinien. — Die allgemeine, umfassende Bedeutung des elektrodynamischen Zusammenhangs zeigt sich nach Kenntnisnahme der Induktion (340, 405). Danach erzeugen nicht nur die elektrischen Kraftlinien bei ihrer Bewegung die zugehörige magnetische Kraft, sondern es erzeugen auch umgekehrt magnetische Kraftlinien bei ihrer Bewegung elektrische Kraft, und die Richtungen der Kräfte und der Bewegung sind auch hierbei wieder durch den elektrodynamischen Zusammenhang gegeben (339). Demnach kann bei Bewegung relativ zum Äther des Ortes keine der beiden Kraftlinienarten für sich allein vorkommen, sondern sie sind in allen Fälllen durch den elektrodynamischen Zusammenhang miteinander verbunden. Auch quantitativ

[1]) Vgl. auch Anhang E Vb, 9.

gilt für die Bewegung magnetischer Kraftlinien eine Gl. 331 vollkommen analoge Gleichung (342). Wir gehen darauf ein, nachdem wir im folgenden erst die Erfahrungsgrundlagen zur Kenntnis der Induktionsvorgänge vorgebracht haben werden.

3. Induktion.

333. Die Kenntnis von den elektrischen und magnetischen Erscheinungen konnte als in sich abgeschlossen gelten, als Faraday eine darüber hinausgehende, neue Erscheinung entdeckte (1831): die Induktion. Man kann sie als eine Erzeugung von Strömen durch Ströme bezeichnen, allgemeiner als Stromerzeugung durch magnetische Kraft, ganz allgemein als Hervorbringung elektrischer Kraft mittels magnetischer Kraft.

Grundkenntnisse.

334. Induktion in geradlinigen Drähten. — Ein einfacher Grundversuch, der diese neuartige Entstehung von Strömen — durch Induktion —

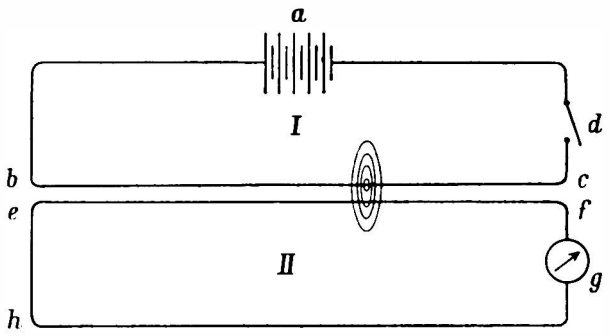


Abb. 64. Induktion an geradlinigen Drähten.

zeigt, kann nach Abb. 64 angeordnet sein. Einige Elemente a liefern Strom in den Leiterkreis I (a b c d), wenn er bei d geschlossen wird. Neben dem Leiter b c und gänzlich isoliert von ihm befindet sich der Leiter e f, welcher über g und h zu einem Kreise II geschlossen ist; er enthält keine Stromquelle, sondern nur ein Galvanometer g.

Schließt man den Strom I, so tritt ein Ausschlag am Galvanometer in II auf, der aber beim Fortfließen des Stromes I gänzlich wieder verschwindet. Unterbricht man nun den Strom I, so erfolgt wieder ein kurzer Ausschlag in II; seine Richtung ist entgegengesetzt der des Schließungsausschlags.

Es ist damit die Entdeckung gemacht, daß das Zustandekommen sowie das Verschwinden eines Stromes stromerzeugend in einem benachbarten Leiter wirkt, daß aber das gleichmäßige Fortfließen eines Stromes keine solche Wirkung hat.

Man nennt — ganz allgemein, für alle solche Induktionsfälle geltend — den vorgegebenen Strom und seinen Leiter, I in der Abbildung, von welchem die Wirkung ausgeht, „primär" oder „induzierend", den neuentstehenden Strom und seinen Leiter II „sekundär" oder „induziert".

Die in der neuen Weise erzeugten Ströme, ganz allgemein „Induktionsströme" genannt, unterscheiden sich übrigens in allen ihren Wirkungen in keiner Weise von den durch Volta-Elemente, Thermoelemente, Influenz- oder Reibmaschinen erzeugten Strömen, was schon Faraday eingehend nachwies.

335. Kraftlinienschnitte. — Die in der eben betrachteten Weise, wie in Abb. 64 induzierten Ströme sind sehr schwach; sie können nur mit empfindlichstem Galvanometer beobachtet werden. Es kommt darauf an, zu wissen, was das Wesentliche im Vorgang sei, um ihn in beliebig verstärkter Wirkung ablaufen zu lassen. Das Wesentliche ist auch hier wieder mittels der Kraftlinien zu erfassen, was sogleich am Beispielsfalle der geradlinigen Drähte gezeigt sei und in allem Folgenden eingehende Nachweise findet.

Wenn der Strom im primären Leiter I geschlossen wird, treten dessen Kraftlinien — die Kreise um ihn (s. Abb. 22, 23), deren einige in Abb. 64 gezeichnet sind — aus ihm heraus (vgl. 337); sie dehnen sich, bis sie die volle, dem fertigen Strom entsprechende Größe haben. Dabei schneiden diese in Bewegung befindlichen Kraftlinien den sekundären Leiter, den Draht e f in Abb. 64, und diese Kraftlinienschnitte sind das Wesentliche für die Entstehung des sekundären Stromes.

Es ist damit auch gesagt, daß Induktionswirkung nur während des Schließens oder Öffnens des Primärstromes eintreten kann, nicht bei gleichmäßigem Fortfließen desselben; denn in letzterem Falle ruhen die Kraftlinien und es finden keine Schnitte statt. Beim Öffnen des Primärstromes sinken dessen Kraftlinien wieder in den Leiter zurück; sie schneiden daher den Sekundärdraht in der entgegengesetzten Richtung — im Vergleich zum Schließen des Stromes —, und dementsprechend erzeugen Öffnen und Schließen auch einander entgegengesetzt gerichtete induzierte Ströme, wie es beobachtet ist.

Man sieht auch, daß der im sekundären Draht induzierte Strom um so stärker ausfallen wird, je stärker der Primärstrom ist, weil der letztere dann mehr Kraftlinien hat, die zum Schneiden kommen. Man sieht ferner, daß und in welchem Maße der Sekundärstrom bei vermindertem Abstand der beiden Leiter verstärkt sein muß; denn es kommen immer nur diejenigen Kraftlinien zu Schnitten mit dem Sekundärdraht, deren Radien größer sind als der Abstand der beiden Leiter von einander; die im Zwischenraum der beiden Leiter verlaufenden Kraftlinien bleiben unwirksam.

Daß vergrößerte Länge der beiden nebeneinander laufenden Drähte, primär und sekundär, verstärkte Induktionswirkung geben wird, ist aus den Schnitten fast selbstverständlich; es wächst dabei die Zahl der wirksamen Kraftlinienschnitte. Man kann die beiden Drähte, wenn sie isolierend umhüllt sind, in großen Längen dicht nebeneinander auf eine Rolle wickeln, wie es Faraday tat, und man erhält dabei entsprechend verstärkte, mit heutigen Galvanometern sehr leicht merkliche Wirkungen.

336. Induktion in Drahtspulen. — Man kann auch jeden der beiden Drähte einzeln auf je eine Rolle wickeln, was vielfache Abänderungen der Beobachtung gestattet. Man hat dann eine primäre Rolle (I in Abb. 65) oder Spule und eine sekundäre (II). Die erstere ist mit einer Stromquelle und einem Stromschlüssel zu verbinden, die zweite mit dem Galvanometer. Hiermit kann folgendes beobachtet werden (336—338):

Schließen und Öffnen des Primärstromes gibt wieder die einander entgegengesetzten Ausschläge am Galvanometer; dauernd gleichmäßiges Fortfließen des Primärstromes läßt das Galvanometer in Ruhe. Die Wirkung ist hier, bei den Spulen, dadurch vervielfältigt, daß jede Kraftlinie, die bei Stromschluß aus den

Windungen der Primärspule heraustritt (vgl. 337), bis deren volles Feld (gleich dem in Abb. 37) entstanden ist, viele Windungen des sekundären Drahtes durchschneidet, was bei gegebener Drahtlänge eine entsprechend vergrößerte Schnittzahl ergibt. Ebenso beim Öffnen des Stromes, beim Zurücksinken der Kraftlinien.

Verstärken und Schwächen des Primärstroms — durch Widerstandsänderungen in seinem Kreis — wirkt wie Schließen und Öffnen, nur in geringerem Maß. Dies stimmt mit den vorkommenden Kraftlinienschnitten, die von gleicher Art sind wie beim Schließen und Öffnen, nur an Zahl verringert.

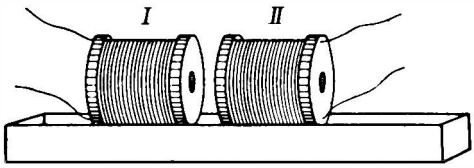


Abb. 65. Primäre und Sekundäre Spule.

Alle diese Wirkungen sind am stärksten bei dichtestem Beisammenstehen der beiden Spulen. Bei größeren Abständen findet man stark verringerte Wirkung, was mit dem zunehmend divergenten Verlauf der Kraftlinien am Spulenende (Abb. 37) übereinstimmt.

337. Induktion durch Bewegung von Leitern. — Nähert man der Sekundärspule plötzlich die Primärspule bei schon vorher in ihr geschlossenem Strom, so erhält man dieselbe Wirkung am Galvanometer wie beim Schließen oder Verstärken des Primärstroms. Ebenso tritt beim plötzlichen Fortnehmen der Primärspule die Öffnungswirkung auf. Dies stimmt wieder mit den vorkommenden Kraftlinienschnitten; denn es ist für Art und Zahl der Schnitte gleich, ob die Kraftlinien ohne oder mit der Spule bewegt sind.

Eben die beobachtete völlige Gleichheit der Wirkungen ist der Nachweis dafür, daß die Bewegungen der Magnetkraftlinien aus dem Leiter heraus und in ihn hinein bei Stromschluß und Öffnen und bei Stromänderung, die wir zur Erklärung schon anfangs eingeführt haben (335, 336), der Wirklichkeit entsprechen. Der Nachweis wiederholt und häuft sich weiter in allem Folgenden, wo zutreffende Schlüsse aus diesen Bewegungen der Magnetkraftlinien gezogen werden (338, 357, 364), ganz besonders bei Betrachtung der Wechselströme (380 u. f.).

Es kommt für die Schnitte nur auf Relativbewegung der Kraftlinien zum Sekundärleiter an. Denn es treten ganz dieselben Wirkungen auf, wenn nicht die Primärspule bei ruhender Sekundärspule bewegt wird, sondern die Sekundärspule bei ruhender Primärspule. Jedesmal gilt es, daß Annäherung der beiden Spulen die Schließungs- oder Verstärkungswirkung des Primärstroms hat, Auseinanderbewegen die Öffnungswirkung.

Befindet sich ein Eisenkern in der Primärspule, so ist ihre Induktionswirkung sehr verstärkt; es stimmt dies mit der starken Vermehrung ihrer Kraftlinien durch den Eisenkern (306). Auch in der Sekundärspule vermehrt Eisen die Wirkung; es werden durch das Eisen die Kraftlinien der Primärspule mehr nach der Seite der Sekundärspule hingezogen (250) und damit die Schnittzahlen mit den Windungen dieser Spule vermehrt.

Alle diese bisher beschriebenen und ähnliche Induktionserscheinungen, bei welchen ein primärer Strom zu Hilfe genommen wird, kann man unter dem Namen „Volta-Induktion" zusammenfassen.

338. Magnet-Induktion. — Da die bisher benutzte Primärspule (I in Abb. 65), wie jede Stromspule, das gleiche Magnetfeld hat wie ein Stahlmagnet-

ſtab (303), muß nach dem Erkannten ein ſolcher Magnetſtab ebenſo induzierend wirken wie die Spule. Dies trifft zu. Schiebt man an Stelle der Spule I einen Magnetſtab horizontal an die Spule II heran, ſo erhält man ebenfalls den Ausſchlag am Galvanometer; beim Wegnehmen des Magneten erfolgt der entgegengeſetzte Ausſchlag. Benutzt man den Magneten in gewendeter Lage, ſo daß ſein anderer Pol an die Spule kommt, ſo ſind die Galvanometerausſchläge verkehrt. Dieſelbe Umkehr iſt übrigens, wie zu erwarten, auch bei Voltainduktion mit der Primärſpule zu beobachten, wenn man deren Enden vertauſcht oder ſie mit gewendetem Strom benutzt.

Man ſieht daraus, daß die Richtung des induzierten Stromes ſowohl mit der Bewegungsrichtung der ſchneidenden Kraftlinien als auch mit der Richtung der Kraftlinien ſich umkehrt. Umkehrung beider Richtungen würde wieder dieſelbe Richtung des Induktionsſtromes geben.

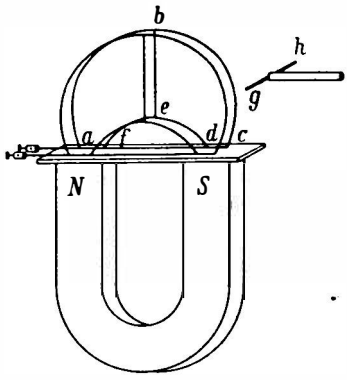


Abb. 66. Keine Induktion bei Gleiten an den Kraftlinien.

Die Induktionswirkung von Stahlmagneten, im Gegenſatz zur Volta-Induktion (336) kurz „Magnet-Induktion" genannt, iſt ſomit nichts Neues, wenn man das Weſentliche, nämlich die Kraftlinienſchnitte ſchon kennt. Sie iſt aber höchſt bemerkenswert als neue Stromerzeugungsmethode, die ganz ohne ſchon vorhandenen, einer ſonſtigen Stromquelle zu entnehmenden Primärſtrom wirkt. Man hat hier die techniſch wichtigſt gewordene Stromerzeugungsweiſe: „Erzeugung von Elektrizität durch gewöhnlichen Magnetismus", wie es Faraday nannte.

339. Nur Schnitte mit Kraftlinien ſind wirkſam; Gleiten iſt unwirkſam. — Dies, ſowie auch das Statthaben der Induktion an beliebig kleinen Leiterſtücken, die Kraftlinienſchnitte erfahren, kann in folgender Weiſe anſchaulich gezeigt werden.

Ein kräftiger Stahlmagnet N S (Abb. 66) trägt auf einem iſolierenden Brett zwei einander gleiche Drahtgerüſte a b c d e f; dieſelben ſtehen parallel zueinander und haben je eine Klemmſchraube. An die beiden Klemmſchrauben wird ein möglichſt empfindliches Galvanometer geſchaltet. Die Drahtbögen a b c und d e f der Gerüſte beſitzen die Formen der Kraftlinien des Magneten (vgl. Abb. 11).

Fährt man mit dem am Stiel gehaltenen Drahtſtück g h ſo an den Drähten dieſer Bögen entlang, daß das Drahtſtück während dieſer gleitenden Bewegung beide Bögen berührt, ſo erhält man keinen Ausſchlag am Galvanometer, obgleich das Drahtſtück den Galvanometerkreis geſchloſſen hält und obgleich es im Magnetfeld bewegt wird. Es ſchneidet aber bei dieſer Bewegung keine Kraftlinien, ſondern gleitet nur an denſelben.

Bewegt man dagegen das Drahtſtück längs b e oder auch längs a f oder c d, ſo erfolgt Ausſchlag des Galvanometers, entſprechend den hier erfolgenden Schnitten mit all den Kraftlinien des Magneten, welche den Zwiſchenraum des großen und des kleinen Bogens ausfüllen.

340. Induktion schon im elektrodynamischen Zusammenhang enthalten. — Die Angabe, daß für Induktion „Schnitte" der magnetischen Kraftlinien mit dem Leiter stattfinden müssen, drückt auch schon aus, daß für beste Wirkung Kraftlinien und Leiter senkrecht zueinander stehen müssen und daß die Bewegungsrichtung senkrecht zu beiden — Kraftlinien und Leiter — stehen muß. Steht die magnetische Kraft nicht senkrecht zum Leiter, so wäre doch nur ihre senkrechte Komponente wirksam; die in Richtung des Leiters fallende Komponente gibt keine Schnitte mit dem Leiter. Ebenso enthält Bewegung in anderer Richtung als der dritten Senkrechten eine unwirksame Komponente, die nämlich nur Gleiten ergibt.

Man sieht, daß es wieder auf dieselben drei aufeinander senkrechten Richtungen ankommt, die schon im elektrodynamischen Zusammenhang auftraten (328—331). Man denke in Abb. 63, welche diesen Zusammenhang festhält, in der mit „elektrische Kraft" bezeichneten Richtung einen Leiter und lasse die „magnetische Kraftlinie" in Richtung der „Bewegung" fortschreiten, so schneidet sie den Leiter und es tritt in ihm die in seiner Richtung liegende elektrische Kraft wirklich auf. Ist der Leiter Teil eines geschlossenen Kreises, der ein Galvanometer enthält, so wird diese elektrische Kraft durch den Strom nachweisbar, den sie hervorbringt. Ist der Leiter nicht linear, sondern beliebig raumerfüllend, so tritt doch die elektrische Kraft in ihm nur in der durch den elektrodynamischen Zusammenhang gegebenen Richtung auf, wofür wir noch Beispiele betrachten werden (371, 402).

Man sieht somit, daß der elektrodynamische Zusammenhang außer den magnetischen Stromwirkungen auch die Induktion umfaßt, wie bereits angegeben (332). Man hat nur festzuhalten, daß sowohl Bewegung elektrischer Kraftlinien magnetische Kraft hervorruft — wie früher betrachtet (328)—, als auch Bewegung magnetischer Kraftlinien elektrische Kraft, so daß die beiden Kraftarten bei vorhandener Bewegung stets gemeinsam da sein müssen.

Daß der elektrodynamische Zusammenhang auch eindeutig den Richtungssinn der induzierten elektrischen Kraft angibt, dies kann in sämtlichen schon beschriebenen und noch folgenden Induktionsversuchen leicht mittels der jeweils in den Leitern auftretenden Stromrichtungen geprüft werden, und wir kommen noch auf eine daraus folgende, oft nützliche Sonderregel für die induzierte Stromrichtung zurück (348). Unmittelbar klar ist es, daß der Zusammenhang die stets beobachtete Stromumkehr bei Umkehr der Bewegungsrichtung — wie bei Öffnen und Schließen des Primärstroms oder beim Nähern und Entfernen — richtig angibt, ebenso die Umkehr bei Umkehrung der Richtung der magnetischen Kraft.

Es sei sogleich bemerkt, was später sich zeigt (405), daß die Induktion elektrischer Kraft durch Bewegung magnetischer Kraftlinien nach Maßgabe des elektrodynamischen Zusammenhangs nicht nur in Leitern gilt, wo sie den Induktionsstrom ergibt, sondern auch in Nichtleitern, ja auch im materiefreien Raum. In Nichtleitern hat die induzierte Kraft die ihr zugehörige Wirkung dielektrischer Verschiebungen (17). Die Bewegung ist dabei immer gegen den Äther des Orts aufzufassen (vgl. 129, 328, 405); ohne solche Angabe hätte sie keinen bestimmten Sinn.

Man verwendet zu Voraussagen über die Richtung induzierter elektrischer Kraft das Modell des elektrodynamischen Zusammenhangs am besten in Gestalt dreier verlöteter Pfeile (wie Abb. 63). Stellt man den magnetischen Pfeil in die Richtung der vorhandenen

magnetischen Kraftlinie und dreht dann das ganze Modell um diesen Pfeil als Achse, bis der Bewegungspfeil in die Richtung der Bewegung dieser Kraftlinie fällt[1]), so gibt der elektrische Pfeil sofort die richtige Richtung der auftretenden elektrischen Kraft an. Das Modell kann auch durch die Regel ersetzt werden, daß beim Blicken in Richtung der magnetischen Kraft die elektrische Kraft nach rechts herum um 90° gegen die Bewegungsrichtung verdreht ist. Beim Blicken in Bewegungsrichtung ist die elektrische Kraft nach links herum gegen die magnetische verdreht.

341. Quantitativer Zusammenhang der Induktionswirkung mit den Kraftlinienschnitten; Induktionsgesetz. — Daß die Galvanometerausschläge in sämtlichen vorbeschriebenen Induktionsversuchen außer von den Kraftlinienschnitten auch vom Widerstand des Sekundärkreises abhängen, davon überzeugt man sich leicht durch Zuschalten verschiedener Widerstände in diesen Kreis. Man findet die Ausschläge unter sonst gleichen Umständen verkehrt proportional dem Gesamtwiderstand des Sekundärkreises. Die Stärke des Induktionsstroms ist also wie jede andere Stromstärke durch Ohms Gesetz bestimmt nach Maßgabe der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes, und es ist die elektromotorische Kraft der Induktion, die induzierte Spannung, welche ihrerseits durch die Kraftlinienschnitte bestimmt ist, wie es dem elektrodynamischen Zusammenhang entspricht (339). Dies ist jetzt quantitativ zu untersuchen.

Die Galvanometerausschläge, bestehend in einmaligem Ausschwingen mit nachfolgender Rückkehr zur Ruhelage, messen, wie wir sahen (299), Elektrizitätsmengen e. Da wir fanden, daß die Ausschläge unter sonst gleichen Umständen mit der Zahl N der geschnittenen Kraftlinien wachsen (334—338), besteht die einfachste Möglichkeit des Zusammenhangs in Proportionalität der bei der Induktion in Bewegung kommenden Elektrizitätsmenge e mit der geschnittenen Kraftlinienzahl N. Die für die Stromstärken J nach Ohms Gesetz bestimmenden elektromotorischen Kräfte V, welche die strömenden Mengen e in Bewegung setzen, wären dann proportional N/t; denn $J = e/t$, wobei t die Zeit ist, während welcher die N Kraftlinien geschnitten werden.

Die so nach den Erfahrungen der beschriebenen Versuche als einfachste Möglichkeit eingesehene Proportionalität der induzierten Spannung V mit der zeiteinheitlichen Kraftlinienschnittzahl N/t ist Wirklichkeit, wie es bei der naturangemessenen Wahl der benutzten Begriffe erwartet werden darf. Ausgedehnte quantitative Erfahrung, besonders mit dem Erdinduktor (353) hat den Beweis dafür geliefert.

Die Proportionalität wird Gleichheit, wenn die Wahl der Spannungseinheit so getroffen wird, daß der Proportionalitätsfaktor 1 wird, und dies ist die Art der Wahl der gebräuchlichen elektromagnetischen Spannungseinheit, von welcher das Volt ein dezimales Vielfaches ist (292). Wir kommen auf diese Spannungseinheit und ihre Verwirklichung noch besonders zurück (354), nehmen sie aber hier, wie auch vorher schon, sogleich in Benutzung. Es ist damit in elektromagnetischen CGS-Einheiten die Spannung an den Enden eines Leiters, der N magnetische Kraftlinien während der Zeit t schneidet,

$$V = \frac{N}{t}. \qquad 341a)$$

[1]) Ist die Bewegung eines Leiters im Magnetfeld gegeben, so ist zu beachten, daß die Relativbewegung der Kraftlinien des Feldes, auf welche das Modell sich bezieht, die entgegengesetzte Richtung hat.

Dies ist das einfache Gesetz für induzierte Spannungen oder elektromotorische Kräfte.

Erfolgen die Kraftlinienschnitte zeitlich ungleichmäßig, so ist nach dem Gesetz auch V nicht konstant; man kann dann mit beliebig kleinen Zeiten dt rechnen, während welchen dN Kraftlinien geschnitten werden[1]), und hat die gleichzeitige Spannung gegeben durch

$$V = dN/dt\,. \qquad 341\,b)$$

342. Andere Form des Induktionsgesetzes. — Entsprechend dem Zusammenhang von Kraftlinienzahl und Feldstärke (244) ist die zeiteinheitliche Kraftlinienschnittzahl N/t auch gleich dem Produkt aus Magnetfeldstärke H und der vom Leiter bei seiner Relativbewegung senkrecht zu den Kraftlinien in der Zeiteinheit beschriebenen Fläche f, durch welches Produkt, H · f, somit ebenfalls die an den Enden des Leiters induzierte Spannung gegeben ist. Es ist dies eine für manche Anwendungsfälle vorteilhafte Form des Gesetzes.

343. Dritte Form des Induktionsgesetzes; quantitativer Anschluß an den elektrodynamischen Zusammenhang. — Noch in anderer Weise kommt das Gesetz zum Ausdruck, wenn man statt der induzierten Spannung die induzierte elektrische Feldstärke E einführt, welche gleich ist dem Quotienten aus der Spannung H · f (342) und der Länge l des bewegten Leiters, E = Hf/l (95). Dabei ist aber f/l gleich der Geschwindigkeit v der Querbewegung des Leiters zu den Kraftlinien, so daß E = H · v. Hierbei ist alles in elektromagnetischem Maße gemessen. Wird aber das elektrische Feld in elektrostatischem Maße gemessen und nur das Magnetfeld im elektromagnetischen, was alle vorhandenen Zusammenhänge am besten hervortreten läßt (vgl. 331), so ist nach dem Einheitsverhältnis (300) statt E Ec zu setzen, und es wird

$$E = H\frac{v}{c}\,. \qquad 343)$$

Dieser einfache Zusammenhang zwischen induzierendem Magnetfeld H und bei der Schnittgeschwindigkeit v induziertem elektrischen Feld E (beide in ihrem Maße gemessen) ist vollkommen analog dem Zusammenhang von E und H beim umgekehrten Fall der Erzeugung magnetischer Kraft durch bewegte elektrische Kraftlinien, wo wir fanden (331)

$$H = E\frac{v}{c}\,.$$

Die Geschwindigkeit v bedeutete in diesem letzteren Falle Relativgeschwindigkeit der wirkenden (elektrischen) Kraftlinien zum Äther des Ortes. Im Falle der Gl. 343 bedeutet v Geschwindigkeit des induzierten Leiters relativ zu den wirkenden (magnetischen) Kraftlinien oder, was dasselbe ist (337), der Kraftlinien zum Leiter. Da aber Induktion nicht nur in Leitern, sondern auch im freien Äther erfolgt (405), kann in beiden Fällen v als Relativgeschwindigkeit der wirkenden Kraftlinien zum Äther aufgefaßt werden.

Beide Gesetze zusammen, E = H v/c und H = E v/c, verbinden die beiden Felder E und H als Ursache und Wirkung miteinander im Sinne des elektrodynamischen Zusammenhangs (340), der somit auch quantitativ die Induktion umfaßt. Das erste Gesetz gilt, wenn H Ursache und E Wirkung, das zweite, wenn E Ursache und H Wirkung ist. Ursache und Wirkung werden

[1]) Vgl. über das Rechnen mit beliebig (unendlich) kleinen Zeiten M 39 und 48.

einander gleich, wenn $v = c$ ist, d. i. bei Kraftlinienquerbewegung mit Lichtgeschwindigkeit; nur in diesem Falle sind Ursache und Wirkung vollkommen miteinander vertauschbar und in den gewählten Maßen einander gleich, $E = H$. Es zeigt sich, daß bei dieser Gleichheit auch die Energien beider Art, elektrische und magnetische, einander gleich sind (s. 274, 365), so daß bei Fortbewegung mit Lichtgeschwindigkeit stets die Hälfte der Energie elektrisch, die andere Hälfte magnetisch ist (365).

Verschiedene Induktionsvorgänge.

Die hier zu betrachtenden Formen von Induktion bieten grundsätzlich nichts Neues; sie geben aber Anlaß zu verschiedenen an sich wichtigen Bemerkungen. Dabei folgen auch neue Erscheinungsformen und einige Anwendungen.

344. Induktion in ganzem Leiterkreise. — Bei Relativbewegung von Leiterkreisen gegen Magnetkraftlinien kommt es oft vor, daß die Kraftlinienschnitte an verschiedenen Teilen des Kreises einander entgegengerichtete Wirkungen haben, so daß sie gar keinen den ganzen Kreis umfließenden Strom hervorbringen. Wird nach solchem Strom gefragt, so ist es einfacher, gar nicht die einzelnen Kraftlinienschnitte zu betrachten, sondern die Gesamtzahl der vom Leiterkreis umfaßten Kraftlinien. Nur wenn diese Zahl sich ändert, tritt Induktion um den ganzen Kreis ein.

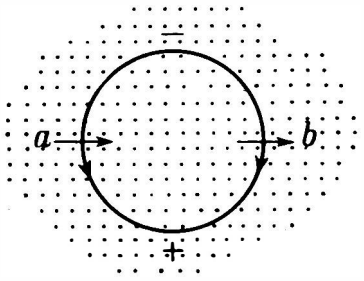


Abb. 67. Induktion in bewegtem Leiterkreis. (Magnetkraft ist nach vorn gerichtet).

Man sieht dies am Falle eines Leiterkreises ein, der quer durch ein homogenes Magnetfeld bewegt wird. Die Pfeile a, b in Abb. 67 geben die Bewegungsrichtung des in der Zeichnungsebene liegenden Kreises an; die Magnetkraftlinien stehen senkrecht zu dieser Ebene und erscheinen daher als Punkte. Sie werden vom Draht des Kreises durchschnitten, wobei aber nach Maßgabe des elektrodynamischen Zusammenhangs Kräfte entstehen, die paarweise einander im Kreise entgegenwirken, wie es die Kreispfeile in der Abbildung anzeigen. Es kommen daher nur die dort ebenfalls vermerkten elektrischen Aufladungen am Kreise zustande, aber kein ihn umfließender Strom. Man bemerkt, daß es die Eintritte und Austritte der Kraftlinien in die Kreisfläche bzw. aus derselben sind, die einander entgegenwirken. Nur wenn Ein- und Austritte in ungleicher Zahl stattfinden, d. i. wenn die vom Kreise umfaßte Kraftlinienzahl sich ändert, und in dem Maße, wie das geschieht, kommt Kreiswirkung zustande[1]). Man hat daher für die im Kreise herum gerichtete elektromotorische Kraft wieder die Gleichung $V = N/t$ (wie Gl. 341), nur daß hier N die Änderung der vom Kreise umfaßten Kraftlinienzahl während der Zeit t bedeutet. Bei Betrachtung einzelner Zeitelemente dt wird auch die zugehörige Änderung der

[1]) Für rechteckige, parallel zu einer Seite bewegte Leiter ist dies unmittelbar einzusehen; zum Beweise der Gültigkeit auch für schräg zu ihrer Richtung bewegte Leiterteile und überhaupt für jede beliebige Gestalt des Leiterkreises dient am besten die zweite Form des Induktionsgesetzes (342).

Kraftlinienzahl unendlich klein, dN, und es ist $V = dN/dt$, wieder wie vorher (Gl. 341 b).

Soll also in geschlossenem Kreise Induktion wirksam werden, so kommt es darauf an, daß er so von Kraftlinien geschnitten wird, daß die Zahl der von ihm umfaßten Kraftlinien sich ändert. Beispielsweise kann man ein Drahtkreisbündel oder eine Spule in sehr verschiedener Weise im Felde eines Stabmagneten bewegen; es werden dabei die Ausschläge an einem angeschalteten Galvanometer immer nach dieser Regel sich richten. Den stärksten Ausschlag erhält man, wenn die Spule von fern her über einen Pol und bis zur Hälfte des Magnetstabes geschoben wird, so daß dieser dann in der Spule steckt; denn hierbei umfaßt die Spule anfänglich gar keine und am Ende der Bewegung sämtliche Kraftlinien des Magneten, die bekanntlich alle sein Inneres durchsetzen (Abb. 14, 255). Eben in dieser Weise kann auch der besondere Nachweis dafür geführt werden, daß Letzteres tatsächlich zutrifft.

345. Durch solche geeignete Bewegung von Drahtkreisen können überhaupt sehr vorteilhaft Magnetfelder gemessen werden. Man bewegt den Kreis von einem Raum außerhalb des Magnetfeldes her plötzlich in dasselbe so hinein, daß die Kreisebene senkrecht zu den Kraftlinien zu stehen kommt. Der dabei am angeschalteten Galvanometer erfolgende Ausschlag ist proportional der von dem Kreis erfaßten Kraftlinienzahl (344); dividiert man diese durch die Flächengröße des benutzten Kreises — bei einem Kreisbündel durch die Windungsfläche (303) —, so erhält man die gesuchte Feldstärke. Die Eichung des Galvanometers auf Kraftlinienzahl kann mittels des Erdinduktors (353) erfolgen, wodurch eine Vergleichung des gesuchten Magnetfeldes mit der nach Gauß zu messenden Horizontalkomponente des Erdfeldes (267) erreicht wird. Als Zuleitungen zum Galvanometer benutzt man Doppeldrähte (284), die keinen Raum zwischen sich lassen, daher auch keine Kraftlinien fassen, so daß sie beliebig in Magnetfeldern bewegt werden können, ohne zur Galvanometerwirkung etwas beizutragen.

Auch in Eisen laufende Kraftlinienzahlen und also Magnetfelder in Eisen oder anderen Stoffen können durch Induktion in Drahtspulen gemessen werden, die um das Eisen gewickelt sind oder über dasselbe geschoben werden können. Es sind dazu die Galvanometerausschläge zu beobachten, die bei Einführung oder Wegnahme des Feldes im Eisen bzw. beim Hin- oder Wegbringen der Spule auftreten (vgl. 344). Man kann so auch Permeabilitäten gut messen (vgl. 251, 257, 302).

346. Faradays Ring. — Auf einen Ring aus weichem Eisen (Abb. 68) ist die primäre Spule I und gesondert die sekundäre Spule II gewickelt. Wird

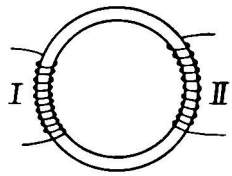


Abb. 68. Faraday's Ring.

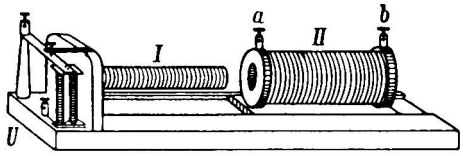


Abb. 69. (Schlitten-)Induktor.

in I Strom geschlossen oder geöffnet, so erhält man von II kräftige Induktionswirkungen in den einander entgegengesetzten Richtungen am Galvanometer. Ohne den Eisenring würde bei dieser gegenseitigen Lagerung der Spulen nur äußerst schwache Wirkung eintreten, weil nur wenig Kraftlinien von I durch II gehen; der Eisenring vermehrt aber die Kraftlinien von I und leitet außerdem den größten Teil derselben durch die Fläche der Windungen von II. Daher die gute Wirkung der Vorrichtung, die damit gleichzeitig mehrere Kraftlinieneigenschaften merklich macht; sie hat Faraday die ersten deutlichen Zeichen des Bestehens der von ihm gesuchten Induktionswirkung gegeben.

347. Schlitteninduktor. — Eine andere, einfache Möglichkeit, fast sämtliche Kraftlinien einer Primärspule zur Induktionswirkung zu bringen, ist die Ineinanderschiebung von Primär-

und Sekundärspule. In der auseinandergeschobenen Stellung, wie in Abb. 69, ist die Wirkung trotz Eisenkerns in I nur schwach; sie läßt sich durch allmähliches Vorschieben von II in beliebigen Zwischenstufen verstärkt einstellen, was für manche Anwendungen vorteilhaft ist.

Der Strom der Primärspule geht hier auch durch den Elektromagneten des selbsttätigen Unterbrechers U, der in leicht verständlicher Weise dauernd wiederholtes Öffnen und Schließen des Stromes besorgt. Dementsprechend liefert die Sekundärspule ebenso oft wiederholte hin- und hergehende Stromstöße. Bei großem Widerstand des an die Klemmen a b, die Enden der Sekundärwickelung, zu schaltenden Leiters, durch welchen die Stromstöße gehen sollen (wie bei den medizinischen Anwendungen), ist große elektromotorische Kraft der Induktion erforderlich, und dies wird durch Vervielfältigung der Kraftlinienschnitte mittels großer Windungszahlen dünnen Drahtes auf der Sekundärrolle II erreicht. Wir kommen auf diesen Induktor in seiner vergrößerten Form — das „Induktorium" — zur Erreichung höchster Spannungen noch zurück (394).

348. Regel für die induzierte Stromrichtung für den Fall konaxialer Spulen oder auch paralleler Drähte. — Es ist nützlich, für diesen oft vorkommenden Fall die aus dem elektrodynamischen Zusammenhang in leichter Überlegung (vgl. 340) sich ergebende Regel festzuhalten: **Der Schließungs-Induktionsstrom ist dem Primärstrom entgegengerichtet, der Öffnungs-Induktionsstrom ist ihm gleichgerichtet.**

Wirksam sind hierbei, wie in allen Fällen, diejenigen Kraftlinien, die bei ihrer Bewegung zu Schnitten mit dem Sekundärleiter kommen, das sind diejenigen Kraftlinien, die bei voller Entwickelung des Primärstroms weit genug ausgreifen, um den Zwischenraum des Primär- und Sekundärleiters zu überschreiten.

349. Webers Theorie des Diamagnetismus. — Auf den einen Pol S eines Elektromagneten (Abb. 70) ist der Eisenzylinder S T gestellt, an welchem der ihn umgebende Aluminiumring R R leicht federnd aufgehängt ist. Der Eisenzylinder bewirkt, daß ein Teil der Kraftlinien des Elektromagneten von S bis gegen T im Eisen und von dort erst am Luftweg nach N verläuft. Schließt man den Strom des Elektromagneten, so schneiden diese Kraftlinien bei ihrem Aufsteigen aus dem Magneten (vgl. 337) den Ring und induzieren dadurch Strom in ihm. Man kann hierbei die unter dem Ring befindliche Magnetspule als Primärspule auffassen, und da nach der soeben entwickelten Regel (348) der Schließungssekundärstrom entgegengesetzt dem Primärstrom gerichtet ist, einander entgegengesetzte Ströme aber einander abstoßen (321), entspricht es dieser Regel, daß der Ring beim Schließen des Elektromagnetstroms am Eisenzylinder S T hochsteigt. Ebenso ist es zu erwarten, daß bei fortfließendem Elektromagnetstrom der Ring bald wieder in die gezeichnete Stellung herabsinken wird und daß er beim Öffnen des Stromes einen Ruck nach unten erhält, entsprechend der Anziehung der nun gleichgerichteten Ströme in R und der Spule. Dies alles wird an der Vorrichtung wirklich beobachtet und kann als Bestätigung von schon Erkanntem angesehen werden.

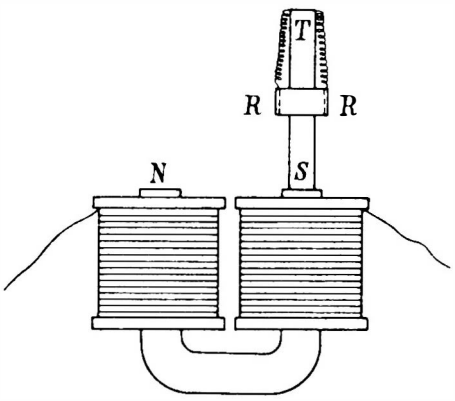


Abb. 70.
Induktion in einfachem Aluminiumring.

Es kann aber das Hinausgestoßenwerden des Ringes aus dem Magnetfeld bei Herstellung desselben als analog dem Hinausgestoßenwerden der diamagnetischen Wismutkugel aus dem Magnetfeld (311, Abb. 47) angesehen werden, und sogar als wesensgleich damit, wenn man annimmt, daß auch in der Wismutkugel bei Stromschluß Ströme induziert werden, welche die Hinausbewegung besorgen. Der Unterschied ist nur dieser, daß die Ströme im Aluminiumring alsbald zum Stillstand kommen, weshalb er zurücksinkt, während sie im diamagnetischen Stoff fortdauernd weiterfließen müßten, da dieser nicht zurücksinkt, solange das Magnetfeld besteht. Das Zurücksinken der Wismutkugel erfolgt erst beim Verschwinden des Feldes, wobei der entgegengesetzt gerichtete Induktionsstoß erfolgt. Dieser Induktionsstoß ist es, der die zuerst induzierten, als fortdauernd anzunehmenden Ströme im Wismut zum Stillstand bringt. Diese fortdauernden Ströme können nicht durchs ganze Volum des Wismuts oder sonstigen diamagnetischen Stoffes kreisen; ihre Energie würde nach Maßgabe des Leitungswiderstandes ebenso in Wärme aufgezehrt werden, wie im Aluminium des Ringes. Nur innerhalb der Moleküle oder Atome der diamagnetischen Stoffe können solche, durch Induktion in Gang zu setzende und dann unvermindert bis zu entgegengerichteter Induktion fortdauernde Ströme angenommen werden. Es sind dies Ströme, ähnlich den schon von vornherein vorhandenen Strömen in Ampères Elementarmagneten (304), die auch keine Erschöpfung zeigen. Dies ist Wilhelm Webers Hypothese von der Natur des Diamagnetismus. Sie kann heute Theorie genannt werden, nachdem das Vorhandensein beweglicher Elektrizitäten (Elektronen) in den Atomen unzweifelhaft nachgewiesen (520 u. f.) und die Möglichkeit fast widerstandslosen, lange anhaltenden Bestehens elektrischer Kreisströme, bei tiefsten Temperaturen, sogar in größerem Volum von Leitern festgestellt ist (511).

Der Diamagnetismus besteht danach, soweit bisherige Kenntnis geht, im Vorhandensein beweglicher Elektronen in den Atomen oder Molekülen des betreffenden Stoffes, die durch Induktion von außen her ins Kreisen versetzt werden können und die diese Bewegung dann bis zu neuer Induktionswirkung beibehalten. Der Magnetismus besteht dagegen, wie wir sahen (304), im Vorhandensein dauernd kreisender (oder rotierender) Elektronen mit wendungsfähigen Bahnebenen (oder Bewegungsachsen).

350. Magnetische Drehung der Polarisationsebene des Lichtes. — Viele Stoffe nehmen, in ein Magnetfeld gebracht, die Eigenschaft an, die Polarisationsebene von Lichtstrahlen zu drehen, wenn solche in Kraftlinienrichtung den Stoff durchsetzen (Faraday, 1845). Die Eigenschaft verschwindet mit dem Verschwinden des Magnetfeldes. Der Drehsinn stimmt bei vielen Stoffen, wie Flintglas, Schwefel, Schwefelkohlenstoff, überein mit der Richtung eines Stromes, der durch Umkreisen des Strahles das vorhandene Magnetfeld hervorriefe, d. i. auch mit dem Umlaufssinn von Elektronen, die durch Induktion bei Herstellung des Magnetfeldes in Bewegung kämen; bei einigen Stoffen, z. B. Eisenchloridlösung, ist der Drehsinn entgegengesetzt.

In allen Fällen liegt der Drehsinn fest am Magnetfeld und — im Gegensatz zur „natürlichen", ohne Magnetfeld anzutreffenden Drehung (O 205 u. f.) — nicht an der Richtung des Lichtstrahles. Läßt man in einem magnetisch drehenden

Stoff einen Lichtstrahl mehrmals längs der Magnetkraftlinien hin und her reflektieren, so vervielfältigt sich daher die Drehung zu entsprechend großen Winkeln; natürliche Drehung, wie in Quarz oder in Zuckerlösungen, kann dagegen so nicht vervielfältigt werden, da jeder Rücklauf des Strahles die Wirkung des Hinlaufs genau aufheben würde.

In materiefreiem Magnetfeld tritt keine magnetische Drehung auf; dieselbe ist also Folge der Mitwirkung der Materie bei der Lichtfortpflanzung. Nach dem angegebenen Drehsinn ist die Annahme erlaubt, daß es die auch den Diamagnetismus bedingenden Elektronen seien, die bei Beteiligung an den Schwingungen des Lichtes den gewöhnlichen Drehsinn, wie bei Schwefel, ergeben; den entgegengesetzten Drehsinn könnten die Elektronen von Elementarmagneten der betreffenden Stoffe ergeben.

Es sei hier erwähnt, daß auch ein Einfluß elektrischer Felder auf die Lichtfortpflanzung in der Materie gefunden ist, die elektrische Doppelbrechung, deren Ursache im einzelnen ebenfalls erst noch weiter zu untersuchen ist.

351. Gedrehter Magnetstab. — Wenn ein zylindrischer Magnetstab um seine Längsachse rotiert, so treten Änderungen der Feldstärke nirgends im Raum auf, weil das Feld um die Drehachse symmetrisch ist. Es kann aber gefragt werden, ob die Kraftlinien des Magneten, die ihn bei fortschreitender Bewegung überallhin begleiten, etwa auch an seiner Drehung teilnehmen oder ob nicht. Da die Kraftlinien Energieverteilungen sind (273) und Energie Masse besitzt (434), die mit den Kraftlinien des Stabes bis ins Unendliche sich erstreckt, kann die Mitdrehung von vornherein als ausgeschlossen erscheinen.

Es sind aber Versuche zur Beantwortung der Frage mittels Induktion ausgeführt worden. Der Magnetstab N S (Abb. 71) kann durch ein Triebwerk in Drehung um die Achse x x versetzt werden; er trägt, leitend an ihm befestigt, eine Metallscheibe m m, in der Abbildung von der Kante erscheinend. Rotieren die Magnetkraftlinien, deren mehrere (k_1, k_2, k_3) in der Abbildung gezeichnet sind, mit ihrem Magneten und also auch mit der Metallscheibe, so ruhen sie an dieser, schneiden sie nicht und können demnach auch keine Ströme in ihr induzieren. Andernfalls, wenn die Kraftlinien nicht mit rotieren, werden sie von der Scheibe geschnitten; die dabei induzierten Ströme müssen nach dem elektrodynamischen Zusammenhang radial gerichtet in der Scheibe verlaufen, müssen also durch zwei Schleiffedern, eine am Rande der Scheibe und eine an der Achse, zu einem Galvanometer ableitbar sein. Die Ausführung des Versuchs zeigt, daß Ströme auftreten. Dennoch kann daraus nicht geschlossen werden, daß die Kraftlinien ruhen; denn wenn dieselben mitrotierten, würden sie zwar nicht die Scheibe m m, wohl aber die Zuleitungen zum Galvanometer schneiden, was ganz dieselbe Induktionswirkung ergäbe. Auch vielfache Abänderungen der Versuche — meist unter dem Namen „unipolare Induktion" beschrieben — haben keine Beantwortung der Frage ergeben. Man sieht hierbei, daß bei Induktionsüberlegungen stets alle stattfindenden Kraftlinienschnitte berücksichtigt werden müssen, vorkommendenfalls auch Schnitte der im Inneren des Magneten laufenden Kraftlinien (vgl. Abb. 14) mit dem Eisen des Magneten selbst. Daher die Unmöglichkeit der Beantwortung der Frage mittels geschlossener Stromkreise.

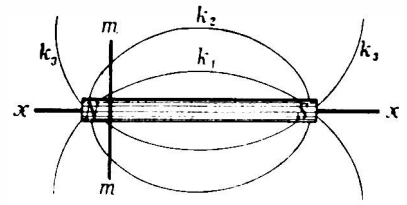


Abb. 71. Unipolare Induktion.

Erdinduktor; Volt, Ohm.

352. Induktion durch die Erde. — Das überall auf der Erdoberfläche verbreitete Magnetfeld bedingt es, daß man kaum irgendeinen Leiter bewegen kann, ohne daß er Magnetkraftlinien schneidet und also Induktion erfährt. Jedes Drahtkreisbündel von einiger Windungsfläche verbunden mit einem empfindlichen Galvanometer, wie es heute leicht zu haben ist, gibt kräftige Ausschläge bei jeder Bewegung, welche die Neigung seiner Ebene zur Inklinationsrichtung

verändert und also wirksam Kraftlinien schneidet. So sieht man, wie das, was einst — wie die Induktion — nur mit Mühe zu entdecken war, mit Mitteln einer späteren Zeit zur Alltäglichkeit wird.

Die Größe der Induktionswirkung mit gegebener Spule ist, wie immer, bedingt durch die Änderung der von ihr umfaßten Kraftlinienzahl (344). Wird also die Spule im Erdfeld um 90^0 so gewendet, daß die Fläche ihrer Windungen von der Lage parallel der Inklinationsrichtung zur Lage senkrecht dazu kommt, wobei die Fläche erst keine der Erdkraftlinien und dann die größte mögliche Zahl derselben umfaßt, so erhält man den größten Ausschlag am Galvanometer, den die Spule bei Wendung um 90^0 im Erdfeld geben kann.

Man kann zu solchen Versuchen die Spule s s um eine feste Achse x x drehbar anordnen, wie es Abb. 72 zeigt; diese Achse muß für die größte Wirksamkeit senkrecht zur Inklinationsrichtung stehen. Setzt man die Drehung, welche die Kraftlinien in die Spulenfläche gebracht hat, im selben Sinn noch um 90^0 weiter fort, so erhält man nochmals denselben Ausschlag und zwar auch in derselben Richtung wie vorher. Es sind jetzt alle Kraftlinien wieder herausgenommen aus der Spulenfläche, was an sich entgegengesetzt zum Hereinbringen der Kraftlinien wirken würde; aber es ist auch die Spule selbst jetzt gewendet, und dies bringt den Strom in der ungewendeten Richtung ins Galvanometer, wie es zu beobachten ist. Noch weiteres Drehen der Spule um zweimal 90^0, bis schließlich 360^0 im ganzen erreicht wird, bringt dann, wie leicht einzusehen, Ausschläge in entgegengesetzter Richtung hervor.

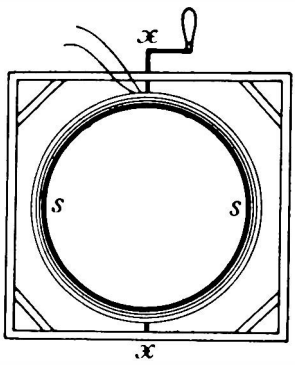


Abb. 72. Erdinduktor.

353. Erdinduktor. — Die soeben gedachte, um eine Durchmesserachse x x drehbare Spule (Abb. 72), wird, wenn sie eine gut ausmeßbare und nicht zu kleine Windungsfläche hat, „Erdinduktor" genannt. Es ist dies eine zu quantitativen Versuchen über Induktion besonders geeignete Vorrichtung (Wilhelm Weber 1852); denn das Erdmagnetfeld steht in beliebiger Ausdehnung mit gut gleichbleibender Stärke und Richtung zur Verfügung, und die Ausmessung der Windungsfläche des Erdinduktors in cm^2 (303), zusammen mit der Ermittelung des Erdfeldes in Gauß (267), gestattet Rechnung nach dem Induktionsgesetz und somit auch zahlenmäßige Prüfung desselben, wie folgt, und dann auf dieser Grundlage Festlegung einer absoluten Spannungseinheit (354).

Es soll nach dem Induktionsgesetz (Gl. 341), $V = N/t$, die induzierte Spannung V proportional der geschnittenen Kraftlinienzahl N und verkehrt proportional der Zeit t sein, während welcher die N Schnitte erfolgen.

Die verkehrte Proportionalität mit der Schnittzeit t ergibt sich aus der Unabhängigkeit der Galvanometerausschläge, welche man bei bestimmter Bewegung des Erdinduktors, d. i. bestimmter Schnittzahl N erhält, von der Geschwindigkeit, mit welcher die Bewegung (z. B. Drehung um 90^0) ausgeführt wird, falls nur die Bewegung zu Ende ist, ehe das Galvanometer weit ausgeschwungen hat (vgl. 299). Denn diese Unabhängigkeit beweist, daß jedesmal dieselbe Elektrizitätsmenge durchs Galvanometer geht (299), was aber nur möglich ist, wenn der induzierte Strom und also auch die Spannung V verkehrt proportional der Zeit ist, während welcher er fließt.

Die Proportionalität der Spannung V mit der geschnittenen Kraftlinienzahl N wird durch Versuche mit verschiedenen Schnittzahlen, d. i. mit verschiedenen Zahlen der von der Windungsfläche umfaßten Kraftlinien erwiesen, indem jedesmal ein der Schnittzahl N proportionaler

Ausschlag sich ergibt. Diese Versuche können am besten mit verschieden gerichteter Drehachse des Erdinduktors bei stets gleichbleibender Drehung um 180° ausgeführt werden, so daß sämtliche von der Windungsfläche erfaßbaren Kraftlinien zweimal zur Geltung kommen (vgl. 352). Steht die Achse senkrecht zur Inklinationsrichtung, so hat diese erfaßbare Kraftlinienzahl den Höchstwert, weil dann die Kraftlinien senkrecht die Fläche durchsetzen können. Dieser Höchstwert ist $N = n \cdot q \cdot K$, wenn n die Windungszahl, q die Fläche jeder einzelnen Windung des Erdinduktors und K die gesamte Feldstärke des Erdmagnetismus ist. Bei allen anderen Richtungen der Achse ist die Kraftlinienzahl kleiner; bei Inklinationsrichtung wäre sie Null. In jedem Falle ist die senkrechte Projektion der Windungsfläche in Inklinationsrichtung maßgebend. Bei Vertikalstellung der Achse, wie in Abb. 72, ist diese Projektion $nq \cos i$; bei Horizontalstellung im magnetischen Meridian ist sie $nq \sin i$, wenn i der Inklinationswinkel ist. Dementsprechend sind die Kraftlinienzahlen in diesen beiden, leicht herzustellenden Fällen $nqK \cos i$ und $nqK \sin i$. $K \cos i$ und $K \sin i$ sind aber auch die horizontale und die vertikale Komponente der gesamten erdmagnetischen Kraft K (vgl. Abb. 15), was zeigt, daß man auch hier wieder (vgl. 260) K in diese beiden Komponenten zerlegen und jeweils mit Kraftlinien nur der einen Komponente rechnen kann, welche zu senkrechter Durchsetzung der Fläche des Induktors kommt, während die andere Komponente unwirksam bleibt, da ihre Kraftlinien die Fläche nur streifen. Wenn die induzierten Spannungen und infolgedessen auch die Galvanometerausschläge den geschnittenen Kraftlinienzahlen proportional sind, muß demnach das Verhältnis der Ausschläge bei Horizontal- und bei Vertikalstellung der Achse gleich der trigonometrischen Tangente des Inklinationswinkels i sein, da nqK, sowie der Einfluß des Widerstandes und der Reduktionsfaktor des Galvanometers aus dem Verhältnis herausfallen. Man kann so mit Hilfe des Erdinduktors den Inklinationswinkel ermitteln, und die Übereinstimmung des so gefundenen Winkels mit dem direkt gemessenen bildet einen besonders genau geführten Nachweis der Proportionalität der induzierten Spannung mit der geschnittenen Kraftlinienzahl.

354. Festlegung der absoluten elektromagnetischen Spannungseinheit; Ursprung des Volt. — Eine Spannungseinheit kann überall hergenommen werden, wo Spannung auftritt. Volta-Elemente, auch Thermoelemente beispielsweise, würden aber willkürliche Wahl bestimmter Stoffe (und Temperaturen) erfordern. Spannungserzeugung durch Induktion erfolgt dagegen unabhängig von solchen Besonderheiten nach dem allgemeinen Gesetz der Induktion (341); dieses Gesetz ist daher geeignet, eine absolute Spannungseinheit zu gründen (vgl. 341), und zwar wird es eine ins elektromagnetische System gehörige Einheit, weil sie auf die in dieses System gehörige Magnetfeldeinheit sich stützt (Wilhelm Weber 1852). Im CGS-System ist diese Spannungseinheit diejenige Spannung, welche an den Enden eines Leiters herrscht, der sekundlich eine Magnetkraftlinie schneidet, oder was dasselbe ist: Die Spannung an den Enden eines Leiterstücks von 1 cm Länge, welches mit der Geschwindigkeit 1 cm/sek quer durch ein Magnetfeld von 1 Gauß bewegt ist. Abb. 17 (263) deutet diese Herkunft der Spannungseinheit aus der Feldeinheit, der Geschwindigkeitseinheit und der Längeneinheit an.

Da diese CGS-Spannungseinheit sehr klein ist, hat man ihr 10^8-faches — dem QUS-System (292) entsprechend — zur technischen Einheit genommen und Volta zu Ehren „Volt" genannt (vgl. Tab. 50). Es ist dies die von uns schon von Anfang an (33) in Gebrauch genommene Spannungseinheit.

Die Verwirklichung der CGS-Einheit der Spannung könnte in folgender Weise gedacht werden (Abb. 73): Zwei parallele Gleitschienen a b und c d sind mit 1 cm Abstand quer durch ein Magnetfeld von 1 Gauß gelegt, von dem daher auf je 1 cm Schienenlänge eine Kraftlinie zwischen den Schienen vorhanden ist (in der Abbildung durch Punkte sichtbar). An diesen Schienen gleitet, sie leitend

berührend, ein Leiterstück e mit 1 cm/sek Geschwindigkeit. Alsdann ist an den Klemmschrauben a c der Schienen die Spannung 1 CGS elektromagnetisch vorhanden.

Zu möglichst genauer Verwirklichung hat sich der Erdinduktor bewährt. Das hierbei benutzte Magnetfeld ist das der horizontalen Erdkomponente, gemessen nach Gauß Methode (267); die zu schneidende Kraftlinienzahl ist durch die Windungsfläche des Erdinduktors bestimmt. Allerdings ist die zeiteinheitliche Schnittzahl und damit auch die am Induktor auftretende Spannung einerseits abhängig von der Drehgeschwindigkeit des Erdinduktors und anderseits auch während gleichmäßiger Drehung nicht konstant, indem in der Stellung der Induktorfläche senkrecht zum Meridian die Kraftlinien von den Windungen nur gestreift, in der um 90° verschiedenen Stellung aber am meisten geschnitten werden. Es kann daher die Verwirklichung der Spannungseinheit mit dem Erdinduktor nicht unmittelbar erreicht werden, wohl aber auf dem Umweg (356) über Einführung und Verwirklichung zunächst der absoluten Widerstandseinheit.

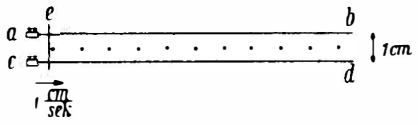


Abb. 73. Zur Definition des Volt.

355. Einführung der absoluten Widerstandseinheit und ihre Verwirklichung mit dem Erdinduktor. — Die Widerstandseinheit ist aus der Spannungs- und Stromeinheit nach Ohms Gesetz hergeleitet, wie bereits früher angegeben (159) und auch in Abb. 17 (263) angezeigt. Setzt man bei Widerstandsberechnungen nach Ohms Gesetz (vgl. 166) Spannungen und Ströme in CGS-Einheiten ein, so erhält man demnach die Widerstände von selber ebenfalls in der CGS-Einheit. Benutzt man die technischen (QUS-) Einheiten, Volt und Weber, so erhält man die Widerstände in der von uns bereits fortlaufend benutzten technischen Einheit, in Ohm. Es ist (Gl. 159) 1 Ohm = 1 Volt/1 Weber und daher ist, nach den im Volt und Weber enthaltenen QUS-Zehnerpotenzen (292), das Ohm gleich 10^9 elektromagnetischen CGS-Widerstandseinheiten (vgl. Tab. 14).

Die Verwirklichung des Ohm geschieht mit dem Erdinduktor nach folgendem Gedankengang:

Die bei Drehung des Erdinduktors auftretenden Galvanometerausschläge, die unabhängig sind von der Drehgeschwindigkeit und von der Verteilung der Schnitte über eine genügend schnelle Viertel- oder Halbdrehung (353), sind außer von den auftretenden Spannungen auch vom Widerstand W des Leitungskreises abhängig (341). Die während jedes Zeitelements dt induzierte Spannung ist $V = dN/dt$ (Gl. 341 b), und der dadurch bewirkte Strom ist nach Ohms Gesetz $J = V/W$. Es ist aber auch $J = de/dt$ (151), wobei de die während der Zeit dt durchs Galvanometer fließende Elektrizitätsmenge ist, und die beiden Gleichungen für J samt der für V ergeben für jedes Zeitelement der Induktionswirkung $dN = W \cdot de$. Summiert über die ganze Zeit der Drehung, während welcher N Kraftlinien geschnitten werden, gibt dies den einfachen Zusammenhang $N = W \cdot e$.

Die dabei durch das Galvanometer fließende Elektrizitätsmenge e wird durch den Ausschlag des Galvanometers in Coulomb oder in CGS-Einheiten gemessen (299), und N ist bei Drehung des Induktors um 180°, wie vorher überlegt (352), die doppelte vom Induktor umfaßte Kraftlinienzahl $N = 2nqH$ (353), ist also ebenfalls bekannt, sobald die Horizontalkomponente H und die Windungsfläche q bei bekannter Windungszahl n gemessen sind.

Man hat daher in dem Zusammenhang von N, W und e das Mittel, aus Galvanometerbeobachtungen an dem um 180° zu drehenden, auf die Horizontalkomponente eingestellten Erdinduktor den Gesamtwiderstand W des Leiterkreises in absoluten Einheiten ausfindig zu machen. Es ist $W = N/e = 2nqH/e$, und man erhält W in CGS-Einheiten, wenn q, H und e in diesen Einheiten eingesetzt werden. Die Umrechnung in Ohm geschieht nach dem schon angegebenen Verhältnis der Einheiten mit dem Faktor 10^{-9}.

Öffnet man nun den benutzten Leiterkreis an einer Stelle, so hat man zwischen den so entstehenden Enden den nunmehr in Ohm bekannten Widerstand, und man kann danach mittels der bekannten Widerstandsvergleichsmethode (168) jeden beliebigen anderen Widerstand ebenfalls in Ohm ermitteln.

Eine solche absolute Widerstandsmessung mit dem Erdinduktor (zuerst von W. Weber 1852 ausgeführt), später — nach Einführung des Ohm (1884) — auch „Ohmbestimmung" genannt, ist, wenn höchste erreichbare Genauigkeit verlangt wird, keine kleine Aufgabe; sie schließt die ballistische Eichung des Galvanometers und die Ermittelung der Horizontalkomponente am Standort des Erdinduktors ein. Man hält daher das Ergebnis solcher Messungen für alle Zeiten fest, und es wurde bereits früher auseinandergesetzt (159), daß und warum dies am besten durch Ausmessung von Quecksilberwiderständen geschieht (Siemens 1860). Das Ergebnis vieler solcher Messungen ist die Kenntnis, daß ein Faden reinen Quecksilbers von 1 mm² Querschnitt und 1·063 m Länge bei 0°C 1 Ohm Widerstand hat. Durch dieses Quecksilbermaß ist das Ohm gesichert aufbewahrbar, bzw. stets wieder herstellbar gemacht, und nach demselben werden alle zu Widerstandsmessungen dienenden Widerstandskästen abgeglichen.

356. Die Verwirklichung des Volt erfolgt sehr einfach mittels des Ohm. Man leitet einen durch Voltameter gesicherten Strom von 1 Weber (293) durch 1 Ohm Widerstand; dann findet sich nach Ohms Gesetz an den Enden dieses Widerstandes dauernd 1 Volt Spannung (163). Auch jede andere Spannung kann so durch geeignete Veränderung der Stromstärke oder des Widerstandes in Volt bekannt hergestellt werden.

Man kann so auch Spannungen herstellen, die in Volt bekannt und genau gleich der Spannung von Normalelementen (210) sind, was man an Stromlosigkeit bei Entgegenschaltung erkennt. Die so ermittelte Spannung (elektromotorische Kraft) solcher Normalelemente, die immer wieder mit gleicher Spannung herstellbar sind, wie z. B. das Clark-Element (vgl. Tab. 48), bedeutet eine Aufbewahrungsweise des einmal aus dem Ohm hergestellten Volt. Mit diesen Elementen eicht man empfindliche statische Spannungsmesser in Volt (37).

Dynamische Spannungsmesser (165) werden ebenfalls mittels Widerstands- und Strommessung in Volt geeicht. Es sei beispielsweise der Widerstand eines solchen Spannungsmessers von Klemme zu Klemme 1000 Ohm, und es werde 0·1 Weber Strom durchgeschickt, gemessen an einem mit Voltameter geeichten Galvanometer. Die dabei eintretende Zeigerstellung des Spannungsmessers muß dann 100 Volt bedeuten; denn dies ist die an seinen Klemmen vorhandene Spannung: 1000 Ohm · 0·1 Weber = 100 Volt.

Sehr hohe Spannungen werden mit dem absoluten Elektrometer in elektrostatischen CGS-Einheiten gemessen (100) und mittels des bekannten, gut gesicherten Einheitsverhältnisses (300) in Volt umgerechnet; es ist eine elektrostatische CGS-Spannungseinheit gleich 300 Volt.

Aus der Spannungseinheit Volt und der aus der Stromeinheit Weber abgeleiteten Mengeneinheit Coulomb (293, 294) folgt auch die Kapazitätseinheit Farad, welche wir schon eingeführt und erläutert haben (50), womit der Aufbau des elektromagnetischen absoluten Einheitssystems abgeschlossen ist (Abb. 17, 263).

Selbstinduktion.

357. Grundvorstellung. — Wenn in einer Drahtspule Strom geschlossen wird, so entwickeln sich während des Anstieges der Stromstärke die Magnetkraftlinien aus den Drähten der einzelnen Spulenwindungen heraus, bis der Endzustand (Abb. 38) erreicht ist (337). Dabei schneiden die aus jeder Windung kommenden Kraftlinien die anderen Windungen der Spule, und dies induziert in denselben nach Maßgabe des allgemeinen Induktionsgesetzes eine Spannung, die somit zu der von außen an die Spule gelegten, den Strom in Gang setzenden Spannung hinzutritt: Die Spule hat „Selbstinduktion". Man kann auch sagen: Jede einzelne Windung der Spule ist Primärleiter zur ganzen Spule als Sekundärleiter.

Selbstinduktion kommt demnach zur Wirkung, so oft Kraftlinien eines Leiters, die ihn selbst schneiden können, eine Verschiebung relativ zum Leiter erfahren. So beim Schließen von Strom im Leiter, beim Öffnen, ganz allgemein bei jeder Änderung der Stromstärke.

358. Die Selbstinduktion ist verschiedenen Leitern in verschiedenem Maße eigen, je nach deren Form und der Ausfüllung ihrer Umgebung. Es kommt darauf an, wieviel Kraftlinien der Leiter bei gegebenem Strom entwickelt und wieviele dieser Kraftlinien zu Schnitten mit dem Leiter selbst kommen. Spulen haben große Selbstinduktion. Sehr große Selbstinduktionen erhält man, wenn dicht gewickelte Spulen mit Eisen gefüllt werden; denn dies vermehrt sehr ihre Kraftlinienzahl (306). Lose gewickelte Solenoide haben weniger Selbstinduktion, weil ein Teil der Kraftlinien nur um einzelne Windungen verläuft (Abb. 36) und also nicht zu Schnitten mit den anderen Windungen kommt. Der gerade gestreckte Draht hat noch viel weniger Selbstinduktion. Ganz fehlt sie ihm aber nicht, weil die Kraftlinien aus den einzelnen Stromfäden im Leiterquerschnitt kommen, welche den Gesamtstrom zusammensetzen, so daß sie bei ihrer Entwickelung zu den fertigen äußeren Kreisen (Abb. 22, 23) die anderen Teile des Querschnittes schneiden. Dicke Drähte haben weniger Selbstinduktion als dünne von gleicher Länge, weil bei den dicken Drähten mehr Kraftlinien im Inneren des großen Querschnittes verbleiben als bei gleicher Stromstärke in dünnem Draht; und die im Inneren bleibenden Kraftlinien kommen nicht zu Schnitten mit dem ganzen Querschnitt. Man kann auch sagen: beim dicken Draht sind die einander induzierenden Stromfäden weiter auseinander als beim dünnen. Am wenigsten Selbstinduktion haben Doppeldrähte für Hin- und Rückleitung des Stromes, weil sie wenig Kraftlinien entwickeln (283). Man verwendet daher solche Stromführung bei Widerstandsspulen, die zwar große Drahtlängen in kleinem Raum fassen, aber keine störenden Induktionserscheinungen geben sollen. Abb. 74 stellt eine solche „induktionsfreie Wickelung" oder „bifilare Wickelung" schematisch dar; der Draht ist in seiner Mitte o geknickt und dann doppelt genommen aufgewickelt, so daß die Enden a und b an die Klemmschrauben kommen.

Abb. 74. Induktionsfreie Wickelung.

Eine Vorrichtung mit großer Selbstinduktion, z. B. eine Spule (mit gewöhnlicher Wickelung), wird meist kurz auch „eine Selbstinduktion" genannt.

359. Extrastrom. — Die durch Selbstinduktion erzeugte Spannung liefert im Leiterkreis einen Stromanteil, der über den von der äußeren Stromquelle gelieferten sich lagert. Dieser Stromanteil wird „Extrastrom" genannt.

Da in parallelen Leitern der Schließungsinduktionsstrom dem Primärstrom entgegengerichtet, der Öffnungsstrom ihm gleichgerichtet ist (347), so ist in Spulen, in geraden Drähten, sowie in einfachen Stromkreisen auch der *Schließungsextrastrom entgegen dem in Schließung begriffenen Strom gerichtet, der Öffnungsextrastrom dem in Öffnung begriffenen Strom gleichgerichtet.*

Daher wirkt die *Selbstinduktion bei Stromschluß hemmend* auf die Entwickelung des Stromes; *bei Öffnung aber verstärkt* die Selbstinduktion den verschwindenden Strom.

Bei großer Selbstinduktion kann die Spannung des Öffnungsextrastromes leicht viel höher sein als die der angeschalteten Stromquelle. Man bemerkt dies an dem Auftreten eines hellen „*Öffnungsfunkens*" an der Unterbrechungsstelle der Strombahn, auch wenn nur wenige Elemente als Stromquelle benutzt sind, deren Spannung für solche Funken nicht entfernt ausreicht. Bei Schließung des Stromes tritt kein Funken auf. Der entgegengerichtete Schließungsextrastrom verlangsamt nur den Anstieg des Stromes; eine Stromumkehr kann er nicht bewirken, weil jedes Absinken des Stromes gleichgerichtete, also das Absinken verhindernde Selbstinduktion zur Folge hätte (s. 363). Nur der Öffnungsextrastrom kann im Funken zur Geltung kommen, weil er gleichgerichtet ist und weil seine Spannung bis zum letzten Augenblick des Absinkens des Gesamtstromes anhält, entsprechend den noch stattfindenden Kraftlinienschnitten, bis zur Zeit der vollendeten Öffnung also, so daß die Spannung eine schon in Bildung begriffene Luftstrecke in Gestalt des Funkens noch durchbricht.

360. Abzweigung des Extrastromes. — Man kann den Extrastrom sowohl bei Schließen als bei Öffnen für sich merklich machen, wenn man einen Nebenschluß zur Selbstinduktion bietenden Spule anbringt, wie es Abb. 75 zeigt. L ist ein Elektromagnet, der stets große Selbstinduktion hat; V ist die Stromquelle, die den Strom i liefert, der bei q durch Eintauchen des Stiftes ins Quecksilber geschlossen, durch Herausziehen geöffnet werden kann, wobei auch die schon überlegten Funken sich zeigen (359). Bei a und b ist der Nebenschluß abgezweigt, der die kleine Glühlampe g zur Stromanzeige enthält. Ist der Strom bei q dauernd geschlossen, so leuchtet die Glühlampe nicht; sie hat zu wenig Strom, weil ihr Widerstand viel größer ist als der des Magneten L. Dagegen leuchtet die Glühlampe sowohl beim Schließen als auch beim Öffnen des Stromes auf. Beim Schließen leuchtet sie, weil der in L entstehende Schließungsextrastrom entgegen i gerichtet ist und daher über g seinen Schluß findet in Richtung des Pfeiles s, wo er den von i dorthin abgezweigten Stromteil unterstützt. Beim Öffnen leuchtet die Lampe durch den Öffnungsextrastrom, welcher mit i gleichgerichtet aus L kommt und, sofern er nicht im Öffnungsfunken bei q Schluß findet, die Glühlampe in Richtung des Pfeiles o durchläuft. Ein geeignetes Galvanometer an Stelle der Glühlampe kann die einander entgegengesetzten Richtungen s und o der beiden Extraströme gut anzeigen.

Man sieht hier deutlich, wie die Selbstinduktionsvorrichtung L als eine be-

sondere Spannungsquelle auftritt, die zu V hinzukommt, sobald eine Änderung der Stromstärke in L eintritt.

361. Quantitative Betrachtung der Selbstinduktion; Selbstinduktionskoeffizient. — Nach dem Induktionsgesetz (Gl. 341 b) ist die durch Induktion erzeugte Spannung $V = dN/dt$, wenn dN die Zahl der Kraftlinienschnitte während der Zeit dt ist. Für einen ganzen Leiterkreis gilt dieselbe Gleichung, wobei N die Zahl der vom Kreis umfaßten Kraftlinien, dN deren Änderung während dt bedeutet (344).

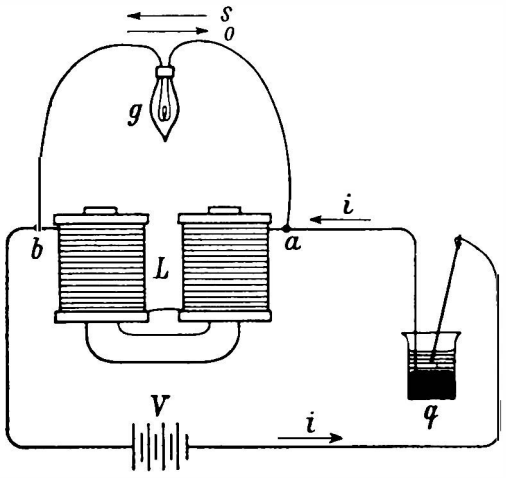


Abb. 75. Selbstinduktion (Extrastrom).

Für den Fall der Selbstinduktion ist dementsprechend N die vom Leiter umfaßte Zahl seiner eigenen Magnetkraftlinien. Diese Zahl ist nach der Proportionalität von Magnetkraft und Stromstärke (299) proportional der Stromstärke i im Leiter. Verschwindet der ganze Strom i, so verschwindet auch die ganze Kraftlinienzahl N; ändert sich der Strom um einen Bruchteil seiner Stärke, so verschwindet auch derselbe Bruchteil seiner Kraftlinienzahl, d. h. es besteht die Proportion $di : i = dN : N$, so daß $dN = di \cdot N/i$ ist. Damit wird die Spannung oder elektromotorische Kraft der Selbstinduktion $V = dN/dt = (dN/di) \cdot di/dt = (N/i) \cdot di/dt$.

Der hier auftretende Faktor N/i bedeutet die bei der Stromstärke Eins vom Leiter umfaßte Zahl seiner eigenen Magnetkraftlinien; er wird „Selbstinduktionskoeffizient" oder Selbstinduktionsgröße des Leiters oder auch kurz „die Selbstinduktion des Leiters" genannt und mit L bezeichnet.

Hat der Leiter dichte Windungen, wie eine Spule, so daß er jede seiner Kraftlinien n-mal umfaßt, so ist sinngemäß die vorhandene Kraftlinienzahl n-fach in L einzusetzen. Demnach ist die Selbstinduktion einer Spule von n Windungen gegeben durch Nn^2, wenn N die Kraftlinienzahl je einer Windung beim Strom 1 ist; denn Nn ist dann die ganze Kraftlinienzahl bei diesem Strome, und jede dieser Kraftlinien ist n-mal umfaßt und also bei Stromänderung wirksam geschnitten. N kann soweit möglich nach der magnetischen Ohmgleichung berechnet werden (302).

Es ist somit die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion in einem Leiterkreise

$$V = L\, di/dt. \qquad 361)$$

Wie die elektromotorische Kraft auf die einzelnen Stücke des Kreises verteilt ist, zeigt Einzelbetrachtung der Kraftlinienschnitte.

Man sieht, daß, was den Strom betrifft, seine Änderungsgeschwindigkeit di/dt maßgebend ist; während der Einfluß der Form und Umgebung des Leiters (358) in L enthalten ist.

Da di/dt von i unabhängig ist, sieht man, daß auch bei schwachem Strom, also geringer elektromotorischer Kraft der Stromquelle, hohe Spannung auftreten kann, wenn die Stromstärke schnell geändert wird, wie beispielsweise bei plötzlicher Unterbrechung, was die schon betrachteten Extraströmfunken (359) auftreten läßt. Wird bei gleicher Form des Leiters seine Umgebung mit einem Stoff μ-facher Permeabilität ausgefüllt, so wird L μ-fach vergrößert.

362. Koeffizient gegenseitiger Induktion. — Es sei bemerkt, daß für die gegenseitige Induktion zweier Leiterkreise sinngemäß dasselbe gilt, wie für die Selbstinduktion. Es ist die von dem einen Leiter in dem anderen induzierte Spannung

$$V = M\, di/dt,$$

wobei M der „gegenseitige Induktionskoeffizient der beiden Leiter", die vom zweiten umfaßte Kraftlinienzahl des ersten bei Strom 1 in ihm ist. Bei zwei Spulen mit gemeinsamem magnetischen Kreis und den Windungszahlen n_1 und n_2 ist $M = N n_1 n_2$, wobei N dieselbe Bedeutung hat wie bei Berechnung der Selbstinduktion (361).

363. Ohms Gesetz bei veränderlichem Strom. — Da im Falle veränderlicher Ströme stets die elektromotorische Kraft V der Selbstinduktion im Leiterkreise vorhanden ist (357), so muß sie bei Anwendung von Ohms Gesetz zur Stromstärkeberechnung in diesem Falle als Summand zur elektromotorischen Kraft V_0 der Stromquelle hinzugefügt werden. Dadurch nimmt Ohms Gesetz (Gl. 156) die Form an

$$i \cdot w = V_0 - L\, di/dt. \qquad 363)$$

Das negative Zeichen ist notwendig, weil beim Ansteigen des Stromes (di/dt positiv) die Induktion entgegengerichtet, beim Absinken (di/dt negativ) gleichgerichtet ist (359). Ändert sich der Strom nicht (di/dt = 0), so hat man von selber die einfache Form von Ohms Gesetz.

Man sieht, daß die Berechnung einer zeitlich veränderlichen Stromstärke nicht ganz einfach ist, weil die Unbekannte i auch als Differential di in der Gleichung vorkommt. Doch gelingt es immer (jedenfalls durch Probieren), wenn der Widerstand w und V_0 (etwa als Funktionen der Zeit) gegeben sind, eine Funktion i der Zeit zu finden, die die Gleichung befriedigt, womit dann der Verlauf der Stromstärke bekannt ist.

So enthält die Gl. 363 die Antworten auf alles, was über den Verlauf veränderlicher Ströme in einfachem Stromkreis gefragt werden kann und zwar ohne die Zweifel, welche bei Überlegungen, die den Sinn der Gleichung ohne quantitative Durchführung benutzen (z. B. 359), leicht übrig bleiben.

Ein einfachster Fall ist der eines in Schließung befindlichen Stromkreises, so daß zur Zeit $t = 0$ noch $i = 0$ ist, wobei w und V_0 unveränderlich gegeben sind. Die Gleichung wird dann durch eine erst schnell, dann immer langsamer ansteigende, zuletzt auf $i = V_0/w$ kommende Stromstärke befriedigt, wie es in der Hauptsache auch schon die Überlegung nach der Übereinanderlagerung des Stromes $i = V_0/w$ mit dem entgegengerichteten, kurzdauernden Extrastrom zeigt (359). Das Ansteigen des Stromes erfolgt um so langsamer, je größer die Selbstinduktion L im

Verhältnis zum Widerstand w ist. Der Endwert $i = V_0/w$ wird genau erst nach unendlich langer Zeit erreicht[1]).

Ein anderes, wichtiges Beispiel mit veränderlicher Spannung V_0, ist später beim Verlauf von Wechselströmen zu betrachten (382).

364. Berechnung der magnetischen Energie elektrischer Ströme. — Wir haben schon gesehen, daß magnetische Kraftlinien eine Energieverteilung im Raume darstellen (273), ebenso wie es bei den elektrischen Kraftlinien der Fall ist (122). Um die Menge der Energie in einem magnetischen Feld — kurz die „magnetische Energie" — in bestimmten Einheiten, z. B. in erg, in ihrer Abhängigkeit von den Kräften des Feldes angeben zu können, ist es erforderlich, die Herstellung eines magnetischen Feldes unter berechenbarem Arbeitsaufwand zu betrachten.

Im Falle des elektrischen Feldes war das Langziehen von elektrischen Kraftlinien, wie es beim Auseinanderziehen der Platten eines geladenen Kondensators von ursprünglich kleinem Abstand aus stattfindet, der zu solcher Berechnung gegebene Vorgang (123); die Arbeit zu solcher Neuherstellung eines elektrischen Feldes war leicht als Produkt aus Kraft und Weg berechenbar. Ein magnetisches Feld kann aber durch Langziehen magnetischer Kraftlinien in einwandfrei berechenbarer Weise nicht hergestellt werden, weil diese Kraftlinien keine Enden haben, an denen gezogen werden könnte. Magnetische Kraftlinien sind immer nur in sich geschlossen vorhanden (255) und zwar als Folgeerscheinung der Bewegung elektrischer Kraftlinien (328). Es ist daher der elektrische Strom mit seinen bewegten Kraftlinien das gegebene Mittel zur Neuherstellung magnetischer Felder, und diese Neuherstellung geschieht während der Ingangsetzung des Stromes, wobei die Magnetkraftlinien aus dem Leiter herauskommen, ihn umfassend (278, 337) und mittels ihres seitlichen Drängens zu wachsenden Kreisen gedehnt (vgl. 368). Hierbei wird gegen den Zug der Kraftlinien Arbeit geleistet und diese ist dann in ihnen aufgespeichert und bildet den Energieinhalt des neu hergestellten magnetischen Feldes.

Die geleistete Arbeit und damit der Energieinhalt des Feldes ist berechenbar. Die Arbeit wird durch die Spannung der den Strom in Gang setzenden Stromquelle geleistet, etwa aus der chemischen Energie eines Volta-Elements, und zwar gegen die Spannung der Selbstinduktion im Leiterkreis, welche das Entstehen des Stromes hemmt. Es ist somit elektrische Arbeit, die hier zu berechnen ist, ganz entsprechend der allgemeinen Entstehungsweise magnetischer Felder; sie wird für die Zeiteinheit berechnet als Produkt aus der Spannung, gegen welche Strom geliefert wird, und der Stärke des Stromes (119). Die Spannung ist die der Selbstinduktion $L\,di/dt$ (361), der Strom ist i, die Arbeit in der Zeiteinheit somit $iL \cdot di/dt$. Dabei bedeutet i die jeweils zur Zeit t während des Stromanstieges vorhandene Stromstärke, und es steigt i vom Anfangswert $i = 0$ bis zum Endwert des fertig ausgebildeten Stroms $i = J$. Die Arbeitsleistung ist währenddessen ungleich verteilt; man muß sie deshalb für jedes Zeitelement dt besonders nehmen und dann über alle Zeitelemente addieren, um die Gesamtarbeit zu erhalten. Die Arbeit in einem Zeitelement dt ist dt-mal so groß als für die Zeiteinheit berechnet, sie ist somit iLdi, und alle diese Einzelarbeiten mit den verschiedenen i, von $i = 0$ bis $i = J$, sind zu addieren. Dies gibt $\frac{1}{2} J^2 L$ [2]), und dies ist somit die gesamte magnetische Energie im Felde eines Leiters von der Selbstinduktion L beim Strome J. Da $L = N/J$ (361), so ist diese Energie, welche wir mit $\mathfrak{E}_m$ bezeichnen, auch

$$\mathfrak{E}_m = \tfrac{1}{2} J^2 L = \tfrac{1}{2} JN. \qquad 364)$$

Die Stromquelle liefert außer dieser, zur Herstellung des Magnetfeldes nötigen Arbeit auch noch Arbeit zur Wärmeerzeugung im Leiter; ist der Strom und damit das Feld fertig hergestellt, so geht alle Arbeit der Stromquelle in Wärme auf (chemische Zersetzungszellen und Motoren abwesend gedacht). Diese Wärmeerzeugung erfolgt allerdings so, daß fortwährend elektrische und

[1]) Wie fast immer in solchen Fällen des allmählichen Übergangs in einen Endzustand ist es die Exponentialfunktion, die den Verlauf richtig darstellt (vgl. das mit der Reibung schwingende, allmählich zur Ruhe kommende Pendel, Anhang M I b, Bd. I). Die der Gl. 363 genügende Funktion ist $i = (V_0/w) \cdot (1 - e^{-tw/L})$. V_0/w ist der Strom aus Wirkung der Stromquelle allein $(V_0/w) \cdot e^{-tw/L}$ ist der entgegengerichtete Schließungsextrastrom.

[2]) Die Addition ist wegen der unendlich großen Anzahl der Summanden eine (sehr einfache) Aufgabe der Integralrechnung. Man sieht aber auch ohne weiteres, daß die Summe gegeben sein muß durch den Flächeninhalt eines rechtwinkligen Dreiecks, dessen Basis (zugleich eine Kathete) J und dessen Höhe (andere Kathete) $J \cdot L$ ist; denn jeder aus diesem Dreieck zu schneidende Vertikalstreifen von der Breite di hat die Fläche je eines der Summanden iL di.

magnetische Energie des Feldes in den Leiter übergeht (330), aus der Stromquelle aber gleichzeitig in gleichem Betrage neu ins Feld nachgeliefert wird (vgl. 162, 367, 368).

365. Berechnung der magnetischen Energiedichte. — Die magnetische Energie $\mathfrak{E}_m$ ist im allgemeinen ungleichmäßig im Felde des Leiters verteilt, wie es auch die magnetische Feldstärke ist. Um den Zusammenhang zwischen dieser Feldstärke H und der Energiedichte zu finden, genügt es einen einfachen Fall zu betrachten.

Das einfachst berechenbare Magnetfeld ist das einer kreisförmig zusammengebogenen Spule, oder — was dasselbe ist — eines mit isoliertem Draht in sich zurücklaufend bewickelten Ringes, von dem nur ein Doppeldraht zur Stromquelle abgeht. Da eine solche ringförmige Spule keine Enden hat, die wie Pole wirken (303), gehen auch keine Kraftlinien von ihr nach außen, sondern dieselben laufen alle im Inneren der Spule in konzentrischen Kreisen.

So wie die geradlinigen parallelen elektrischen Kraftlinien eines engen, großflächigen Plattenkondensators den einfachsten möglichen Fall eines gut begrenzten elektrischen Feldes bilden, so sind die konzentrischen Kreise in diesem Spulenring der einfachste mögliche Fall der immer in sich geschlossenen magnetischen Kraftlinien bei guter Begrenzung des Feldes. Die Länge der Kraftlinien, gleich dem Kreisumfang des Ringes, sei l; der klein angenommene Querschnitt des Feldes, gleich der Fläche der Drahtwindungen, sei q. Das Volum des Feldes ist dann lq. Die Windungszahl sei n. Die Kraftlinienzahl ist dann beim Strom J und der Permeabilität μ des Ringinneren nach Gl. 302 in CGS-Einheiten $N = 4\pi Jn\mu q/l$. Die Selbstinduktion (361) ist $L = Nn/J = 4\pi n^2\mu q/l$. Die ganze magnetische Energie ist demnach $\mathfrak{E}_m = \frac{1}{2} J^2 L = 2\pi J^2 n^2 \mu q/l$ und die Energie der Volumeinheit oder Energiedichte des homogenen Feldes im Ringinneren ist $\mathfrak{E}_m/lq = 2\pi J^2 n^2 \mu/l^2$. Das Feld im Raum mit der Permeabilität μ ist $H = N/q\mu = 4\pi Jn/l$. Man sieht somit, daß tatsächlich die magnetische Energiedichte

$$\mathfrak{D}_m = H^2\mu/8\pi \qquad 365)$$

ist und zwar in erg/cm³, wenn H in Gauß gemessen ist, wie es in Analogie mit der elektrischen Energiedichte $\mathfrak{D}_e = E^2\varepsilon/8\pi$ (Gl. 123) schon früher erwähnt wurde (274).

Damit ist die Verteilung der magnetischen Energie in jedem gegebenen Felde aus dessen Kraftlinienlauf ersichtlich; es gelten hier analoge Überlegungen, wie wir sie für die elektrische Energie durchgeführt haben (124).

Man kann auch bemerken, daß jede einzelne magnetische Kraftlinie eines und desselben Stromes die gleiche Energiemenge tragen muß, ob sie lang oder kurz ist; denn die gesamte magnetische Energie ist proportional der Kraftlinienzahl (Gl. 364). Dies ist analog der Gleichheit der elektrischen Energie der einzelnen elektrischen Kraftlinien zwischen den Belegungen eines und desselben Kondensators (124). Je 1 cm der Kraftlinie im Felde H hat die Energie $H/8\pi$ (vgl. 124).

Da nach dem elektrodynamischen Zusammenhang (328) bei Fortbewegung der Kraftlinien mit Lichtgeschwindigkeit die elektrostatisch gemessene elektrische Feldstärke E gleich wird der elektromagnetisch gemessenen magnetischen Feldstärke H (331, 343), so ist dann im materiefreien Raume ($\mu = \varepsilon = 1$) auch die elektrische Energiedichte $E^2/8\pi$ gleich der magnetischen $H^2/8\pi$. Solche Fortbewegung der Kraftlinien mit Lichtgeschwindigkeit findet stets bei ungehinderter Ausbreitung elektromagnetischer Felder statt, so bei elektrischen Wellen (412, 416, 420), nahezu aber auch bei jeder elektrischen Entladung und Strombildung (126) bei genügend freiem Raume zur Kraftlinienentwickelung (vgl. 284), und es ist also hierbei die Hälfte der Gesamtenergie elektrisch und die andere Hälfte magnetisch.

366. Selbstinduktion als Trägheitserscheinung. — Die Selbstinduktion bewirkt, wie wir sahen (359), eine Verspätung im Zustandekommen des elektrischen Stromes bei Schließung seines Kreises und ein Streben zum Weiterfließen desselben beim Öffnen, wie es im Öffnungsfunken sich zeigte. Diese Erscheinungen beim Fließen der Elektrizität sind gleich den Trägheitserscheinungen beim Fließen einer Flüssigkeit in einer Rohrleitung. Dieses Fließen braucht auch Zeit, um nach Aufdrehen des Hahnes in vollen Gang zu kommen,

weil die im Rohre vorher ruhende Flüssigkeit Trägheit besitzt und erst eine beschleunigte Bewegung nach Maßgabe des vorhandenen Druckgefälles ausführen muß, bevor sie ihre durch die Reibung begrenzte Endgeschwindigkeit annehmen kann. Ebenso kann beim Zudrehen des Hahnes die Flüssigkeit im Rohre infolge ihrer Trägheit nicht sofort zur Ruhe kommen; sie strebt weiter zu fließen und übt, wenn dies verhindert ist, Drucke aus, die weit höher sein können als die, welche das Fließen verursacht haben. Dies sind die Erscheinungen des hydraulischen Widders (M 380); sie sind analog denen des Extrastromfunkens (359, 360).

Der Vergleich mit der trägen Flüssigkeit ist durchaus treffend, wenn man der Elektrizität in jedem Leiter Trägheit nach Maßgabe der Selbstinduktionsgröße L des Leiters zuschreibt. Man versteht alle Erscheinungen der Selbstinduktion sogar weit unmittelbarer und einfacher, wenn man sie als Trägheitserscheinungen auffaßt, im Vergleich zur Zuhilfenahme der ins Einzelne gehenden Induktionsvorstellung mit dem Extrastrom oder den Kraftlinienschnitten; man geht so auch weniger leicht in die Irre. Es kann dies an dem früher betrachteten Beispiel (360, Abb. 75) bei Vergleichung mit den dortigen Erläuterungen bemerkt werden. Man übersieht da unmittelbar, daß der Strom nach Eröffnung seines Weges bei q zunächst über die Glühlampe g fließen wird, weil der andere Weg, über L, vergleichsweise große Selbstinduktion, d. i. große Trägheit bietet; erst allmählich, dieser Trägheit entsprechend, kommt der Fluß auch über L zustande. Ist gleichmäßiges Fließen eingetreten, so kann die Trägheitsverschiedenheit nichts mehr ausmachen, weil keine Geschwindigkeitsänderungen vorkommen. Wird aber die Leitung bei q unterbrochen, so stürzt die bewegte Masse aus L weiter, nimmt den Weg über g und durchbricht auch q im Öffnungsfunken.

Die Gleichheit des Verhaltens des elektrischen Stromes und eines Flüssigkeitsstromes, der einen seiner Geschwindigkeit proportionalen Reibungswiderstand findet, ist auch quantitativ vollständig. Denn die aus Erfahrung genommenen Bewegungsgleichungen der beiden Vorgänge sind einander gleich. Die Gleichung für den elektrischen Vorgang haben wir oben angegeben (363); sie ist Ohms Gesetz mit Berücksichtigung aller tatsächlich wirkenden elektromotorischen Kräfte. Die Gleichung für den Flüssigkeitsstrom, der unter einseitigem Druck mit veränderlicher Geschwindigkeit durch eine Röhre aus einem Behälter in einen anderen fließt, ist Galileis und Newtons Grundgesetz aller Bewegung (M Gl. 116a) mit Berücksichtigung aller wirkenden Kräfte. Diese Gleichung ist $m\,dv/dt = K - hv$, wenn m die Masse der Flüssigkeit im Rohre, v ihre Geschwindigkeit, K die Kraft des Druckes, h die Kraft der Reibung bei Einheitsgeschwindigkeit ist. Man sieht bei Vergleichung mit Gl. 363 ($Ldi/dt = V_0 - wi$), daß einander analog und von ganz gleicher Bedeutung sind[1]):

die Geschwindigkeit v	und	die Stromstärke i,
die Kraft K	und	die elektromot. Kraft V_0 der Stromquelle,
die Reibungsgröße h	und	der Widerstand w,
die Masse m	und	die Selbstinduktion L.

Das Gleichverhalten dieser hier analog befundenen Größen bewährt sich auch in allen noch weiterhin zu behandelnden Fällen veränderlicher Ströme (397).

[1]) Vgl. auch Anhang E IV.

367. Die Masse liegt im elektromagnetischen Feld. — Bei der quantitativen Vollständigkeit der Analogie von Selbstinduktionsgröße und Masse liegt der Gedanke nahe, nach dem Vorhandensein einer Masse zu suchen, die bei Ingangsetzung eines Stromes in Bewegung käme. Eine Masse der Elektrizität im Leiter kann es nicht sein; denn die Selbstinduktionsgröße L ist beim selben Draht eine andere, wenn er zur Spule gewickelt ist, als wenn er geradegestreckt oder gar bifilar gelegt ist (358). Wohl aber kann die Masse in den Kraftlinien des Stromes gesucht werden; denn mit diesen hängt L zusammen (361), und diese sind es, die beim Zustandekommen des Stromes in Bewegung kommen. Haben diese Kraftlinien Masse, so muß das Zustandekommen des Stromes allmählich stattfinden, wie es der Wirklichkeit entspricht.

Es war dies das erste ersichtlich gewordene Zeichen dafür, daß die Kraftlinien mit Masse verbunden sind. Da Kraftlinien mit Energie verbunden sind (122 u. f., 236 u. f.), stimmt dies Zeichen damit überein, daß Energie stets Masse hat, was wir bereits öfter angegeben haben und was zuletzt unzweifelhaft nachzuweisen sein wird (434, 458). Es ist somit die Masse der Energie der Kraftlinien, welche die Trägheitserscheinungen der Selbstinduktion ergibt, und die Größe der Trägheit kommt in der Selbstinduktionsgröße L des Stromleiters zum Ausdruck. In der Tat zeigten wir, daß die magnetische Energie $\mathfrak{E}_m$ eines Stromes J die Größe $\frac{1}{2} J^2 L$ hat (Gl. 364), so daß $L = 2\,\mathfrak{E}_m/J^2 = \mathfrak{E}/J^2$ ist, wobei $\mathfrak{E}$, die gesamte Energie des elektromagnetischen Feldes des Stromes, als das Doppelte der magnetischen Energie $\mathfrak{E}_m$ genommen ist (365). Die Selbstinduktion L ist danach gleich der elektromagnetischen Energie des Feldes des Leiters bei der Stromstärke Eins; sie ist somit Maß der Energieaufnahmefähigkeit des Leiterfeldes. Die im Felde bei bestimmtem Strom vorhandene Energiemenge, und daher auch deren Masse, ist demnach gegeben durch die Selbstinduktionsgröße L des Leiters, woraus man sieht, daß die Analogie von L mit Masse nicht äußerlich, sondern in der Natur der Dinge begründet ist, da Energie tatsächlich Masse hat.

368. Entwickelung des elektromagnetischen Feldes. — Die Energie des Feldes eines elektrischen Stromes ist vor Stromschluß als rein elektrische Energie in ruhenden elektrischen Kraftlinien vorhanden, wie wir dies früher schon betrachteten (125, 162). Vom Augenblicke des Stromschlusses an, wobei die elektrischen Kraftlinien in Bewegung kommen, beginnt mit dem zu ihrer Bewegung gehörenden Auftreten der magnetischen Kraft die Verwandlung der elektrischen Energie in magnetische, entsprechend dem elektrodynamischen Zusammenhang (328 u. f.); erreicht die Fortbewegung der Kraftlinien Lichtgeschwindigkeit, so ist die Hälfte der elektrischen Energie in magnetische verwandelt (365). Im ganzen bleibt dabei die Energie des Feldes ungeändert; daher ist auch die im Feld befindliche Masse ungeändert, obgleich der Strom ansteigt (der nur mit dem magnetischen Teil der Energie zusammenhängt). Dem entspricht es, daß der Vorgang wie die Beschleunigung einer unveränderlichen Masse[1]) abläuft (366).

Das Auftreten der magnetischen Kraftlinien bei beginnender Bewegung elektrischer Kraftlinien muß von den Enden der letzteren ausgehen. Denn die neu auftretenden Magnetkraftlinien in Gang kommender elektrischer Ströme kommen aus dem Inneren der Stromleiter heraus (337), wo die Enden der elektrischen Kraftlinien des Stromes in Bewegung sind. Von diesen Enden aus, d. i. von den bewegten elektrischen Elementarquanten aus, verbreiten sich demnach

[1]) Daß immer wieder neue Kraftlinien aus der Stromquelle nachkommen, während vorangegangene im Leiter versinken, ist unwesentlich; wesentlich ist die in jedem Zeitelement gleiche Größe der zu beschleunigenden Masse. Ebenso bei dem in der Rohrleitung zwischen zwei Behältern zu beschleunigenden Wasser.

die neuen magnetischen Kraftlinien über die ganze Länge der elektrischen Kraftlinien, stets quer zu diesen und zu deren Bewegungsrichtung stehend, wie es dem elektrodynamischen Zusammenhang entspricht. Es scheint hier eine besondere Eigenschaft der elektrischen Elementarquanten vorzuliegen, daß sie die Entwicklungsherde der Magnetfelder sind[1]).

Induktion und Energiegesetz.

369. Stromerzeugung durch Induktion nur mit Arbeitsleistung möglich. — Da der elektrische Strom Energie zur Verfügung stellt, kann nach dem Energiegesetz Stromerzeugung auch durch Induktion nur unter Energieverbrauch stattfinden und zwar so, daß die verbrauchte Energie gleich der im induzierten Strom enthaltenen Energie ist. Dies trifft auch zu, wie das Folgende dem Sinne nach und Späteres (373) auch quantitativ zeigt.

Es sind zu Induktion stets Schnitte von magnetischen Kraftlinien erforderlich (341). Die Leitung mit dem induzierten Strom befindet sich demnach notwendigerweise in einem Magnetfeld und zwar in Relativbewegung quer zu den Kraftlinien (339). Zwischen jedem in einem Magnetfeld befindlichen Strom und dem Magnetfeld wirkt aber stets eine Kraft, die ebenfalls quer zum Magnetfeld steht (316), und zwar ist diese Kraft nach dem elektrodynamischen Zusammenhang, bzw. der Handregel stets entgegengerichtet der den Strom induzierenden Bewegung. Diese Bewegung kann daher nur unter Arbeitsleistung vor sich gehen, sobald überhaupt Strom induziert wird.

Im einzelnen zeigt sich dies wie folgt: Man bewege Magnetkraftlinien, die wie in Abb. 63 von hinten nach vorn gerichtet seien, mit dem Hufeisenmagneten, zwischen dessen Polen sie sitzen mögen, in Richtung des Bewegungspfeiles der Abbildung, d. i. nach rechts, so induziert man in einem Leiter Strom in Richtung des Pfeiles der elektrischen Kraft, nach oben. Dieser Strom treibt aber nach der Handregel den Nordpol des Magneten (der hinter der Zeichnungsebene der Abbildung liegt und ebenso den vorn liegenden Südpol) nach links, somit entgegen seiner Bewegungsrichtung, so daß bei der induzierenden Bewegung gearbeitet werden muß, wie behauptet. Es ist dabei gleich, ob das Magnetfeld oder der Leiter als bewegt angesehen wird, da es bei der Induktion nur auf Relativbewegung der beiden gegeneinander ankommt. Auch ist es gleich, ob das bewegte Magnetfeld an einem Stahlmagneten, an einer Stromspule oder an einem sonstigen Stromleiter sitzt; denn Magnetfelder wirken immer kraftübertragend auf die Vorrichtungen, zu welchen sie gehören (320).

Würde einer der drei Pfeile des elektrodynamischen Zusammenhangs umgekehrt, so würde jede induzierende Bewegung eine sie fördernde Kraft wecken, und der induzierte Strom und die Kraft würden einander fortdauernd steigern, ein Perpetuum mobile bildend. Die Pfeilrichtungen des aus den Erfahrungen des Elektromagnetismus und der Induktion genommenen elektrodynamischen Zusammenhangs stehen daher in festem Zusammenhang mit dem Energiegesetz.

370. Energieregel für Induktion. — Man hat nach vorigem die öfter nützliche allgemeine Regel: Wird ein Strom durch Bewegung induziert, so ist er stets so gerichtet, daß er die ihn erzeugende Bewegung zu hemmen strebt. Beispiel: Bei Annäherung eines Stromes an einen Leiter muß in diesem ein Strom induziert werden, der die Annäherung hemmt, der also Abstoßung gibt; dies ist aber ein entgegengesetzt gerichteter Strom (321), und dies trifft auch zu (337, 348). Ebenso schließt man richtig, daß bei Entfernen ein

[1]) Elektrische Kraftlinien ohne Enden, die bei den elektrischen Wellen vorkommen (421), entwickeln — soweit zu sehen — überhaupt keine magnetischen Kraftlinien bei ihrer Bewegung, sondern sie sind schon von vornherein mit denselben versehen; sie können auch im Ruhezustand — ohne Magnetkraftlinien — gar nicht bestehen.

gleichgerichteter Strom induziert wird. Weitere Beispiele der einfachen Schlußmöglichkeiten, welche die Regel bietet, zeigt das Folgende (371, 372).

Eine andere Regel desselben Inhalts ist diese: „Jede Vorrichtung, die durch Bewegung in einem Magnetfelde Induktionsstrom liefert, kann auch als Motor wirken, wenn Strom in sie hineingesandt wird." Denn der hineingesandte Strom ergibt im Magnetfeld die oben betrachtete, einer induzierenden Bewegung entgegen gerichtete Kraft (369). Ist somit der hineingeleitete Strom von derselben Richtung wie der bei Induktion herausgelieferte, so wird die Vorrichtung zurücklaufen; ist er entgegengesetzt gerichtet, wird sie voranlaufen wie bei der Induktion.

Ebenso gilt, wie leicht einzusehen, die Umkehrung der Regel, nämlich: „Alles was mittels eines Magnetfeldes als Motor laufen kann, kann auch durch Induktion stromliefernd wirken". Ein einfaches Beispiel davon ist das Rad im Magnetfeld (318), das bei Drehung durch äußere Kraft als stromliefernde Vorrichtung wirkt, und Beispiele im großen sind die gebräuchlichsten Elektromotoren und die ihnen gleichen Stromerzeugungsmaschinen (375).

371. Wirbelströme. — Es wird nun auch eine merkwürdige Erscheinung leicht verständlich, die schon vor Entdeckung der Induktion beobachtet, aber bis dahin unerklärlich geblieben war.

Eine horizontale Kupferscheibe k k, Abb. 76, kann um ihre vertikale Mittelpunktsachse, von unten angetrieben, in Drehung versetzt werden. Über der Scheibe befindet sich eine Glasplatte und auf dieser die Spitze für die Magnetnadel S N. Die bei ruhender Scheibe im Meridian stehende Nadel wird bei Drehung der Scheibe in deren Drehrichtung abgelenkt; bei genügend schneller Drehung folgt die Nadel ganz im Kreise herum und dauernd der Scheibe. Bei Umkehr der Drehrichtung der Scheibe kehrt auch die Nadel um. Wirkung von Luftbewegung ist durch die Glasplatte ausgeschaltet; nur gut magnetisierte Nadeln und nur Scheiben aus gut leitendem Stoffe, wie Kupfer, zeigen die Erscheinung.

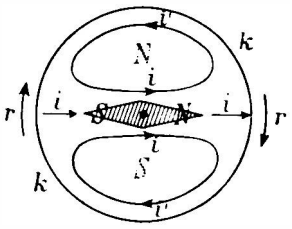


Abb. 76. Induktion in gedrehter Kupferscheibe (Wirbelströme).

Als richtige, allen Prüfungen standhaltende Erklärung ergibt sich folgendes: Die Kraftlinien der Magnetnadel durchsetzen unterhalb deren Polen die Kupferscheibe; sie schneiden also dieselbe bei ihrer Drehung. Dabei induzieren sie Ströme in der Kupferscheibe, die jedenfalls so gerichtet sein müssen, daß sie die sie erzeugende Bewegung, d. i. die Drehung der Scheibe hemmen (370). Die Nadel zieht also mittels ihres Magnetfeldes die Scheibe zurück; dann zieht aber vermöge der nie fehlenden Gegenkraft auch die Scheibe die Nadel voran, und dies ist es, was beobachtet wird.

Dabei ist es vermöge der Allgemeingültigkeit des benutzten Satzes nicht nötig, den Verlauf der induzierten Ströme in der Scheibe im einzelnen zu erkennen; doch ist es nicht schwierig, denselben anzugeben. Der elektrodynamische Zusammenhang (Abb. 63), angewandt auf die beiden Stellen der Kupferscheibe, wo die von den Polen der Nadel nach unten sich erstreckenden Kraftlinien sie durchdringen, ergibt, daß dort Ströme in Richtung der Pfeile i induziert werden, wenn die Scheibe im Sinne der Pfeile r rotiert. Diese längs des Scheibendurchmessers gerichteten Ströme unter der Nadel finden ihren Schluß in den Randteilen der Scheibe beiderseits über i', so daß zwei innere Elektrizitätskreisungen die Scheibe durchlaufen, die auch bei Bewegung der Nadel stets ihre Lage zu derselben behalten. Man nennt solche innere Ströme, die ohne Ableitung nach außen in Leiterräumen kreisen, „Wirbelströme"; sie entstehen oft bei Bewegung von Metallstücken in Magnetfeldern.

Diese Ströme haben aber ihre eigenen Magnetkraftlinien; sie stellen zwei Pole dar (303), N und S (punktiert in der Abb. 76), und diese Pole sind es, die, wie man aus ihrer Lage zu den Nadelpolen sieht, immerfort die Nadel hinter der Scheibe hertreiben.

372. Magnetische Dämpfung. — Man sieht nach der Energieregel (370) leicht ein, daß eine Magnetnadel, die in der Nähe von gut leitendem Metall schwingt, gedämpft sein und bald zur Ruhe kommen muß, weil sie im Metall Ströme induziert, die ihre Bewegung hemmen.

Man verwendet solche „magnetische Dämpfung" oder „Kupferdämpfung" bei Kompassen, indem man sie in eine Kupferschale setzt; bei Galvanometern, Multiplikatoren, hat sie die Gestalt einer dicken Kupferhülse zwischen Nadel und Drahtwindungen. Diese Dämpfung wirkt mit vollkommener Gleichmäßigkeit, besser als jede Reibungsdämpfung. Drehspulgalvanometer (319) können eine besondere, nach außen abgeleitete Spule zur Dämpfung haben, in die man verschiedene Widerstände einschalten kann, um die Dämpfung beliebig zu regulieren; es wirkt hier die Bewegung der Spule im Felde des Stahlmagneten. Elektrizitätszähler, die kleine, mit einem abgezweigten Teile des Verbrauchsstromes laufende Elektromotoren sind, haben eine Kurzschlußwickelung im Felde ihres Stahlmagneten, die vollkommen gleichmäßige, der Stromstärke proportionale Laufgeschwindigkeit sichert, wenn Reibungen möglichst fehlen.

In sehr starken Magnetfeldern bewegen sich gut leitende Metallstücke mit entsprechend stark merklichem Widerstand, als wären sie in sehr zähe Flüssigkeit gebettet; sie unterliegen einer unsichtbaren Reibung, die durch die starken induzierten Wirbelströme vorgetäuscht ist. Diese Ströme wirken in der Tat wie es Flüssigkeitsreibung bei langsamer Bewegung tut, nämlich mit einer der Geschwindigkeit proportionalen Gegenkraft.

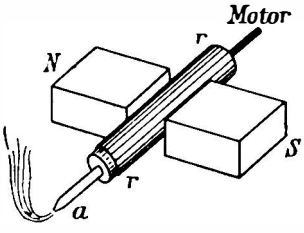


Abb. 77. Wärme-Entwicklung bei der magnetischen Dämpfung.

Läßt man ein Kupferstück mittels eines Motors dauernd in einem Magnetfeld rotieren, so geht die ganze Arbeit des Motors auf diese unsichtbare Reibung, und es ist die Frage, was dann aus der Arbeit wird? Sie wird Wärme, ganz wie bei wirklicher, gewöhnlicher Reibung; solche im Magnetfeld dauernd bewegte Metallstücke werden heiß. Es ist Stromwärme, die hier erscheint, da die induzierten Wirbelströme, die keine Wirkungen nach außen ausüben, alle ihre Energie im Metall lassen müssen, wo nichts anderes als Wärme daraus wird.

Man kann solche Wärmeentwickelung unter Arbeitsverbrauch, deren Vermeidung bei Elektromotoren und Dynamomaschinen wichtig ist (375), leicht sichtbar machen an einem dickwandigen Kupferrohr r r (Abb. 77), das man mittels eines Motors zwischen den Polschuhen NS eines kräftigen Elektromagneten (etwa wie Abb. 46) rotieren läßt. Sobald der Strom des Magneten geschlossen wird, verlangsamt sich die Rotation sehr und die Wärmeentwicklung beginnt. Sie wird sichtbar, wenn mit Äther getränkte Watte im Rohre ist; es strömt dann Ätherdampf beim Ansatzrohr a aus, der entzündet werden kann, und dessen erst sehr kleine Flamme während der Rotation zunehmend wächst.

Diese Wärmeentwickelung durch Wirbelströme ist auch quantitativ im Kalorimeter untersucht. Sie zeigte sich ebensogroß wie Reibungswärme bei gleichem Arbeitsverbrauch, und es war dies eine besonders bemerkenswerte Kontrolle des Energiegesetzes, da hier die Wärme nicht unmittelbar aus mechanischer Arbeit entsteht, sondern auf dem Umweg über elektrische Energie.

373. Quantitative Betrachtung der Energieumwandlung bei Induktion durch Bewegung. — Es ist auch ohne neue Messungen aus den schon gefundenen Gesetzen leicht zu zeigen, daß die bei der Stromerzeugung aufgewendete mechanische Arbeit und die gewonnene elektrische Energie von gleicher Größe sind, wie es dem Energiegesetz entspricht.

Wir betrachten dazu einen Leiterkreis, von dem ein Teil von der Länge l mit der Geschwindigkeit v quer durch ein Magnetfeld H bewegt sei, wodurch in ihm der Strom J entstehe. Das Leiterstück erzeugt durch Induktion die Spannung $H \cdot v \cdot l$ im Stromkreis (342), weil vl die von ihm in der Zeiteinheit beschriebene Fläche ist. Die damit in der Zeiteinheit in den Stromkreis gebrachte elektrische Energie ist Spannung mal Strom $= Hvl \cdot J$. Die dabei aufgewendete mechanische Arbeit ist, ebenfalls für die Zeiteinheit berechnet, Kraft mal Weg/Zeit, wobei die Kraft die des induzierten Stromes im Magnetfeld ist, deren Größe $H \cdot J \cdot l$ beträgt (316). Die aufgewendete mechanische Arbeit ist somit $HJl \cdot v$ und ist also, wie man sieht, gleich der gewonnenen elektrischen Energie.

Damit sind Energiegesetz, Induktionsgesetz und Kraftgesetz für Ströme im Magnetfeld in feste Verbindung miteinander gebracht,

so daß sie einander als richtige Naturerkenntnisse stützen; alles was eines derselben bestätigt, bestätigt damit auch die anderen.

Man bemerkt, daß die Gewinnung elektrischer Energie aus mechanischer Arbeit, wie sie in der Induktion verwirklicht ist, ein quantitativ viel einfacherer, übersichtlicherer Vorgang ist als Gewinnung aus chemischer Energie, wie in Voltas Elementen, oder die aus Wärme, wie in den Thermoelementen.

Die so einfach zu erkennende Verwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie mittels Induktion durch Bewegung kommt auch bei der Stromerzeugung im großen zur Geltung (375).

374. Vorgänge bei Induktion durch Schließen und Öffnen von Strömen. — Weniger einfach zu übersehen ist die Herkunft der elektrischen Energie der Sekundärströme bei Induktion ohne Bewegung von Leitern oder Magneten, wovon bisher das Hauptbeispiel die Schließungs- und Öffnungswirkung von Primärströmen war (335, 337).

Auch in diesem Falle ist bei der Schließung die Gegenwirkung von seiten des induzierten Stromes auf das Magnetfeld des Primärstroms vorhanden. Das Feld wird zurückgedrängt; da aber der Leiter, an dem es sitzt, festgehalten ist, wird es in den Leiter hineingedrängt, somit im Heraustreten aus demselben, worin es begriffen ist (337), verhindert, was eine Mehrleistung der Stromquelle zum Ansteigen des Primärstromes bedeutet (vgl. 364). Diese Mehrleistung ist der Ursprung der Energie des Schließungs-Induktionsstromes.

Beim Öffnen eines Primärstromes sinkt sein aus der Energie der Stromquelle entwickeltes Magnetfeld teilweise in den Sekundärleiter hinein, wenn ein solcher vorhanden ist, und ergibt damit die Energie des Sekundärstromes, statt ganz wieder in den Primärleiter zurückzusinken. Es fehlt daher auch beim Öffnen die im Sekundärleiter erscheinende Energie im Primärleiter.

Diese Induktionsvorgänge ohne Bewegung von Leitern, die mit kurzer Dauer beim Schließen und Öffnen vorkommen, finden sich in voller Ausbildung und mit Fortdauer bei Wechselströmen (386, 391).

375. Erzeugung stärkster Ströme durch Induktion. — Vorrichtungen, die dauernd fließende Ströme durch Induktion erzeugen, sind uns schon begegnet, so der gedrehte Magnetstab (351) und das Rad im Magnetfeld (318, 370); sie waren schon Faraday bekannt. Das von ihm gefundene Gesetz der Induktion (341) zeigte auch den Weg zur Erlangung beliebig starker Ströme durch Induktion, viel stärkerer als irgend eine der anderen Stromquellen zu liefern vermag.

Diese Überlegenheit der Induktion beruht darauf, daß hier der ganze Stromkreis aus bestleitendem Stoff bestehen kann. Reib- und Influenzmaschinen benutzen mechanischen Transport der Elektrizität an Nichtleitern; Voltas Ketten müssen die nicht gut leitenden Flüssigkeiten benutzen und die Thermosäulen ebenfalls schlecht elektrizitätsleitende schlechte Wärmeleiter. Zudem ist die Beziehung zwischen aufgewandter Arbeit und gewonnener elektrischer Energie bei der Induktion so einfach (373), daß Umwandlung der ganzen Arbeit angestrebt werden kann. Von Wärme ist dagegen immer nur ein Teil in andere Energieformen umwandelbar (228), und für die Umwandlung chemischer Energie in elektrische sind nur eingeschränkte Möglichkeiten gefunden.

Zur Erlangung der für starke Ströme nötigen elektrischen Kräfte sind hohe Kraftlinienschnittzahlen in der Zeiteinheit erforderlich. Schon für 1 Volt wären es 10^8 Schnitte/sek (354 und Tab. 50). Es ist daher die beste Ausbildung des Eisenkreises für die Magnetkraftlinien und des Kupferkreises für den Strom nötig, wie schon bei den Elektromagneten und Motoren bemerkt (308), zusammen mit schneller Bewegung, um viel Kraftlinien und kurze Schnittzeiten je Kraftlinie zu haben. Die benutzten Vorrichtungen sind dieselben, die wir als Elektromotoren schon betrachtet haben (309), entsprechend dem Satze, daß alles, was als Motor im Magnetfeld läuft, auch stromerzeugend wirken kann

(370). Die Ausbildung dieser Vorrichtungen, des Ringankers (Abb. 78) und des Trommelankers (Abb. 44), ist in der Tat zuerst zum Zweck der Stromerzeugung erfolgt; denn erst nach gelungener Herstellung guter Stromquellen durch Induktion konnten entsprechende Motoren in Gebrauch kommen.

Die Induktion findet im engen Raum r r (Abb. 78) beiderseits zwischen rotierendem Anker oder „Läufer" und den Polschuhen des Feldmagneten statt, der auch „Ständer" genannt wird. In diesem engen Raum gehen sämtliche Kraftlinien des Magneten in das Eisen des Läufers über, so daß sie von dem Kupfer der Läuferwindungen geschnitten werden. Der elektrodynamische Zusammenhang (329, Abb. 63) gibt, angewandt auf diese Schnitte, den in Abb. 78 angegebenen Stromlauf im Ringanker, wenn derselbe in der Richtung der Pfeile p p rotiert. Positive Elektrizität staut sich oben, negative unten am Ring; an diesen beiden Punkten ist aber auch fortdauernd die Ableitung des Stromes an den Bürsten des „Kollektors"[1]) vorgesehen, so daß dauernd gleichgerichteter Strom von diesen Bürsten abgenommen werden kann.

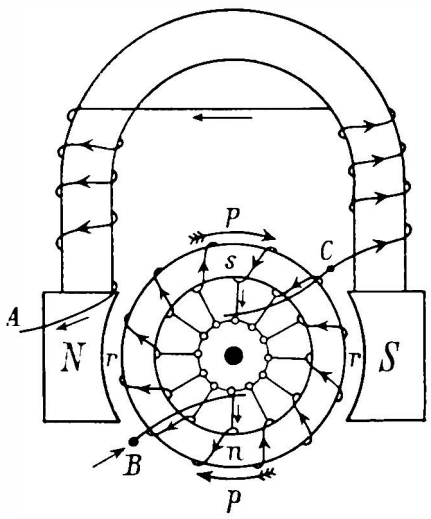


Abb. 78. Dynamo-Maschine mit Ringanker.

Der Ringanker hat nutzlose Drahtteile. Aller Draht im Inneren des Ringes schneidet keine Kraftlinien; denn diese bleiben im Eisen des Rings (vgl. Abb. 13). Daher ist der Trommelanker (Abb. 44) besser, weil er diese unnützen Drahtteile vermeidet; allerdings bietet er einige Umständlichkeit in der Führung der Drähte um die Achse herum, worauf hier nicht einzugehen ist.

Anfänglich benutzte man als Feldmagneten gute Stahlmagnete; doch vertragen dieselben die Erschütterungen der schnellen Rotationen schlecht, und sie geben auch nie die stärksten, mit Elektromagneten erreichbaren Felder. Die Schwierigkeit, daß Elektromagnete eine schon vorhandene Stromquelle voraussetzen, wurde umgangen durch das „Dynamo-Prinzip" (Wheatstone, Siemens, 1887), das vom stets vorhandenen remanenten Magnetismus im Eisenkern eines einmal gebrauchten Elektromagneten ausgeht. Schaltet man den Anker so an die Windungen des Feldelektromagneten (Abb. 78), daß der von dessen remanentem Magnetismus induzierte Ankerstrom diesen Magnetismus verstärkt, so wird auch der induzierte Strom und damit wieder der Magnetismus verstärkt, was bis zur Sättigung des Eisens (258) von selber weiter sich steigert und dann dauernd den stärksten möglichen Strom der Maschine liefert. So entstanden aus den „magnetelektrischen Maschinen" die „dynamoelektrischen" oder kurz „Dynamomaschinen", die heutigen Quellen stärkster Ströme.

Zu bemerken ist, daß die Eisentrommeln oder Ringe der Dynamomaschinen, wie auch der Motoren, keine Wege für Induktionsströme in ihnen bieten dürfen; denn solche Ströme, Wirbelströme (371, 372), würden nutzlos Arbeit verzehren und schädliche Erhitzung geben. Es müssen

[1]) Beim Motor (309) ist für diesen Kranz von Metallstücken der Name „Verteiler" passender.

daher diese Eisenteile in Richtung der Induktion, d. i. in Richtung der Drehachse nichtleitend sein, dennoch aber in Richtung der Magnetkraftlinien in ihrem Inneren ununterbrochenes Eisen bieten. Dies wird erreicht durch Herstellung der Ringe aus lackierten oder oxydierten Eisendrahtbündeln, der Trommeln aus ebensolchen Eisenblechscheiben.

Nicht besonders zu erörtern sind Stromverzweigungen in den Wickelungen der Feldmagneten, die zum Zweck der Erreichung gleichbleibender Spannungslieferung der Maschinen trotz wechselnder Stromabnahme oder zu anderen Zwecken des Gebrauchs eingeführt wurden, ebenso auch die Anbringung von 4 oder mehr Feldmagnetpolen statt nur zweien um den Anker; sie bieten nichts wesentlich Neues.

376. Über Induktionswirkung in Motoren. — Wenn ein Elektromotor läuft, schneiden seine Ankerwickelungen ganz ebenso die Kraftlinien seines Magnetfeldes wie bei einer Dynamomaschine; es findet also Induktion im Draht des Motors statt, und zwar muß der induzierte Strom so gerichtet sein, daß er die ihn erzeugende Bewegung hemmt (370), somit entgegengerichtet dem von außen in den Motor geleiteten Strom, der ihn antreibt. Der Motor bietet in dieser Weise, sobald er läuft, dem ihn treibenden Strome eine Gegenkraft, gegen welche die Stromquelle beständig arbeiten muß.

In dieser Eigenschaft, bei Stromzufuhr Gegenkraft zu entwickeln, ist der laufende Elektromotor gleich der in Ladung befindlichen Kleistschen Flasche, gleich der elektrolytischen Zersetzungszelle mit ihrer Polarisation oder dem Akkumulator (202 u. f.) und gleich der Thermosäule (227). Alle diese Vorrichtungen können den hineingesandten Strom oder einen bestimmten Teil desselben in verkehrter Richtung wieder herausliefern. Der Motor tut dies, wenn er eine Weile gegen das an seiner Achse befindliche Trägheitsmoment gearbeitet hat und dann von der Stromquelle abgeschaltet weiterläuft; er wirkt dann mittels des aufgespeicherten Vorrats von kinetischer Energie als Dynamomaschine und gibt Strom in verkehrter Richtung heraus, entsprechend der elektromotorischen Gegenkraft, die auch beim Antrieb durch Strom in ihm ist. Man sieht, daß der Unterschied der genannten vier Vorrichtungen nur in der Energieart besteht, die sie in sich aufzuspeichern vermögen. Beim Elektromotor ist es kinetische Energie, bei der Kleistschen Flasche elektrische Energie, beim Akkumulator chemische Energie, bei der Thermosäule Wärme.

Die vom laufenden Motor entwickelte elektromotorische Gegenkraft ergibt eigentümliche Energieverhältnisse, die aus folgender Zusammenstellung bei Vergleichung des laufenden mit dem festgehaltenen Motor ersichtlich werden.

V ist dabei die (konstante) Spannung der Stromquelle, W der Widerstand im Motorkreis. Ist V an den Klemmen einer sehr ergiebigen Stromquelle (Zentrale) gemessen, so gilt W auch zwischen diesen Klemmen, nämlich als Widerstand im Motor; bei Elementen als Stromquelle wäre deren innerer Widerstand in W einbezogen. M sei die im laufenden Motor entwickelte Gegenspannung, gegen welche die mechanische Arbeit des Motors von der Stromquelle geleistet wird. Es gelten dann nach bekannten Gesetzen und Beziehungen (156, 119, 213) folgende Zusammenhänge (alles in CGS-Einheiten):

Motor	Stromstärke	Leistung		
		entnommen aus der Stromquelle	geliefert im Motor als mech. Arbeit	geliefert im Motor als Wärme
festgehalten .	$J = \frac{V}{W}$	$V \cdot J = \frac{V^2}{W}$	0	$J^2W = \frac{V^2}{W}$
laufend . .	$i = \frac{V-M}{W}$	$V \cdot i = \frac{V(V-M)}{W}$	$M \cdot i = \frac{M(V-M)}{W}$	$i^2W = \frac{(V-M)^2}{W}$

Man sieht daraus: 1. Die Gesamtleistung im Motor, Arbeit samt Wärme, ist bei festgehaltenem sowie bei laufendem Motor gleich der Leistung aus der

Stromquelle, wie es nach dem Energiegesetz sein muß. 2. Sobald der Motor laufen gelassen wird, nimmt der Strom von J auf i ab. Daher nimmt auch die Wärmeentwickelung im Motor ab; aber es wird Arbeit geleistet. 3. Die Gesamtleistung nimmt zwar auch ab im Verhältnis $J:i = V:(V—M)$; aber das Verhältnis Arbeit/Wärme steigt von Null auf $M/(V—M)$.

Die Gegenkraft M steigt bei anlaufendem Motor von Null aus; sie wächst überhaupt mit steigender Drehzahl[1]), und je größer M ist, desto sparsamer arbeitet der Motor, weil dann das Verhältnis Arbeit/Wärme steigt. Daher müssen Elektromotoren immer schnell laufen, um sparsam zu sein. Eine Grenze liegt darin, daß bei zu schnellem Laufe das Eisen des Ankers der fortwährenden Ummagnetisierung nicht mehr folgen kann (258). Bei zu langsamem Laufen, d. i. bei zu starker Belastung oder zu plötzlichem Anlassen (ohne „Anlaßwiderstand"), wird die starke Wärmeentwickelung auch gefährlich für den Motor.

377. Elektrische Arbeitsübertragung. — Die Dynamomaschine verwandelt mechanische Energie in elektrische Energie; sie tut es, indem in ihr gegen die hemmende Kraft gearbeitet wird, welche induzierte Ströme stets der induzierenden Bewegung entgegenstellen (370). Wird die so erhaltene elektrische Energie durch Stromleiter einem Elektromotor zugeführt, so erfolgt ihre Rückverwandlung in mechanische Energie, und dies kann auch an sehr fernem Orte geschehen. Dadurch ist die elektrische Arbeitsübertragung gegeben. Sie hat gegenüber den älteren Einrichtungen den großen Vorzug, keiner beweglichen Teile, wie laufender Achsen, Riemen oder Seile zu bedürfen, wodurch die Übertragung auf große Entfernungen überhaupt erst möglich geworden ist. Man kann so die stromerzeugenden Maschinen dort aufstellen, wo Energiequellen günstig zur Verfügung stehen, etwa wo Wassergefälle für Turbinen oder Kohlen für Dampfmaschinen vorhanden sind, und kann die Energie, auch beliebig unterteilt, an die entfernten Verbrauchsstellen fortleiten. Aber selbst auch innerhalb einer Fabrik ist elektrische Arbeitsübertragung von einer zentralen Maschine unter Fortfall von langen Achsen und Riemen günstig, besonders wenn viele kleine Arbeitsmaschinen anzutreiben sind.

Da 1 Kilowatt = 1·36 PS ist (216), würde man zur Übertragung einer Pferdekraft, Verluste ungefähr eingerechnet, bei 100 Volt Spannung 10 Weber Strom oder bei 200 Volt 5 Weber fortleiten müssen, was weder besonders dicke Drähte erfordert, noch Isolationsschwierigkeit macht. Bei Fortleitung sehr großer Energiemengen auf große Entfernungen müssen allerdings viel höhere Spannungen mit dann entsprechend geringeren Strömen (216) benutzt werden, weil starke Ströme zu dickes Kupfer erfordern oder zu viel Spannungsverlust geben würden (164). Bei 100000 Volt können mit 10 Weber, was nicht zu viel Kupfer erfordert, schon fast 1000 PS übertragen werden. Es kommt nur darauf an, die hohen Spannungen hervorzubringen und sie am Verbrauchsort beliebig wieder zweckmäßig herabzusetzen ohne Energie zu verlieren, und dies ist alles mit dem sogleich zu betrachtenden Wechselstrom vorteilhaft möglich (388, 394).

---

[1]) M muß nach dem Induktionsgesetz proportional der Drehzahl und der Stromstärke im Feldmagneten sein, sofern die Permeabilität des Eisens konstant ist; im allgemeinen steigt M wesentlich mit der Drehzahl.

Wechselstrom.

378. Wechselstromerzeugung. — Strom, dessen Richtung gleichmäßig wiederkehrend wechselt, wird „Wechselstrom" genannt. Der gewöhnliche Strom von gleichbleibender Intensität und Richtung heißt im Gegensatz zum Wechselstrom auch „Gleichstrom".

Wechselstrom ist durch Induktion besonders leicht zu erzeugen. Schon die sekundäre Spule des einfachen Induktoriums (347) gab Wechselstrom, wenn die primäre Spule mit einem Stromunterbrecher versehen ist, und für die Induktion von Wechselstrom durch Bewegung gab der Erdinduktor ein grundlegendes Beispiel (352). Wir sahen, daß der induzierte Strom bei jeder Halbdrehung des Erdinduktors im gleichbleibenden Magnetfeld seine Richtung wechselt; bei jeder ganzen Umdrehung erhält man einmal hin- und einmal zurücklaufenden Strom, und fortlaufend gleichmäßig Drehung des Induktors würde Wechselstrom geben, dessen „Wechselzahl" oder „Periodenzahl" gleich der Drehzahl des Induktors ist.

Ganz in dieser Weise arbeiten die einfachsten Wechselstrommaschinen. Der in Abb. 43 dargestellte Motor kann als Wechselstrommaschine benutzt werden; es ist nur erforderlich, statt des Stromwenders zwei einfache Schleifringe anzubringen, zwischen welchen die Läuferwickelung liegt und von denen Federn oder Bürsten den Strom abnehmen. Der Feldmagnet muß Gleichstrom haben, zu dessen Erzeugung oft eine kleine Gleichstrommaschine in die Wechselstrommaschine eingebaut wird. Will man Wechselstrom von der Periodenzahl beispielsweise 50 haben, so muß die Maschine bei dieser Ausführung 50 Umdrehungen in der Sekunde machen. Man kann aber auch mit langsamem Umlauf hohe Wechselzahlen erhalten, wenn man den Läufer als Rad ausbildet, an dessen Umfang viele Spulen angebracht sind, die an ebenso vielen ruhenden Spulen mit abwechselnden Polen vorbeilaufen, welche das Rad umgeben und zusammen den Ständer bilden. Die Spulen sind alle auf radial gerichtete Eisenkerne gewickelt. Ein großer Raddurchmesser ergibt hier zusammen mit der Windungszahl der hintereinander geschalteten Spulen die zur Erreichung der gewünschten Spannung erforderliche zeiteinheitliche Kraftlinienschnittzahl. Die Periodenzahl des Wechselstromes solcher Maschinen ist gleich der Drehzahl des Läufers vervielfältigt mit seiner halben Spulenzahl. Denn jedesmal, wenn die Spulen des Läufers an denen des Ständers eben vorbeigehen, ist der Strom Null, weil die von den Spulen umfaßte Kraftlinienzahl in diesem Augenblick ihren Höchstwert erreicht hat, also sich nicht ändert; und jede Periode des Wechselstromes umfaßt zwei Nullwerte des Stromes.

Wechselströme haben besondere, charakteristische Eigenschaften, die dem konstanten Gleichstrom ganz fehlen (380 u. f.).

379. Zum Nachweis oder zur Messung von Wechselströmen sind unter den vielen schon beschriebenen Strommessern nur wenige, bestimmte unmittelbar verwendbar, nämlich, wie schon bemerkt: Hitzdrahtinstrumente (220), Weicheiseninstrumente (305) und Dynamometer (327).

Einen äußerst empfindlichen Nachweis für schwächste Wechselströme liefert das Telefon; mit Gleichstrom bleibt es tonlos, weil die Eisenmembran in einer Gleichgewichtsstellung bleibt. Die geringste Überlagerung des Gleichstromes mit einem Wechselstrom, was einem in Stärke schwankenden Gleichstrom gleichkommt, zeigt aber das Telefon innerhalb der Hörbarkeitsgrenzen mit Sicherheit an.

380. Kraftlinienbewegungen der Wechselströme. — Die charakteristischen Besonderheiten der Wechselströme beruhen alle auf dem steten Aus- und Einschwanken ihrer Magnetkraftlinien. Wenn der Strom in der einen Richtung im Ansteigen ist, treten neue Kraftlinienringe aus dem Leiter heraus; wenn er dann wieder absinkt, kehren sie in den Leiter zurück, um gleich darauf, wenn der entgegengesetzt gerichtete Strom im Ansteigen ist, mit verkehrter Richtung wieder herauszutreten und dann wieder zurückzusinken, womit die Periode abgeschlossen ist und Wiederholung beginnt. Bei diesen Bewegungen schneiden die Kraftlinien fortdauernd alle Leiter der Umgebung und auch den eigenen Stromleiter, womit Induktion und Selbstinduktion in fortdauernde Tätigkeit treten, ohne daß am Strom etwas geändert oder der Leiter bewegt wird, und hieraus gehen die besonderen Wechselstromeigenschaften hervor. Grundsätzlich Neues tritt dabei nicht auf; doch sind diese Eigenschaften so bemerkenswert, daß wir sie kurz betrachten.

Quantitativ und im einzelnen hängt alles von der „Form" des Wechselstromes ab, d. i. von seinem genauen zeitlichen Verlauf innerhalb der Periode. Die Form stellt sich dar als Linie mit der Zeit als Abszisse und der Stromstärke als Ordinate. Es genügt sinusförmige Wechselströme zu betrachten, einesteils weil die gebräuchlichen Vorrichtungen nahe oder ganz Ströme dieser Form erzeugen, anderenteils weil jede andere Form als Übereinanderlagerung von Sinusformen betrachtet werden kann, wie es bei den Schallwellen der Fall ist (A 64). Eine in homogenem Magnetfeld gleichmäßig gedrehte Spule, wie der Erdinduktor (353) würde genau sinusförmigen Wechselstrom geben. Die Linie I in Abb. 80 stellt zwei Perioden eines sinusförmigen Wechselstromes dar. Die je nach der Stromrichtung nach oben oder nach unten in willkürlichem Proportionalmaß aufgetragene Stromstärke ändert sich hier mit der längs der Grundlinie laufenden Zeit wie der Sinus mit seinem Winkel sich ändert[1]). Die Zeit verläuft dabei von links nach rechts, und jeder Punkt der Linie stellt den Stromzustand (die „Phase") am ganzen Leiter zu der betreffenden Zeit dar. Man sieht, daß der Strom in je einer halben Periode, von der Zeit 0 bis T/2, nach der einen Richtung und in der anderen halben Periode, von T/2 bis T, nach der entgegengesetzten Richtung läuft, daß er in der Mitte und am Ende jeder Periode, bei T/2 und T, wo seine Richtung wechselt, einen Augenblick Null ist, und daß sein Schwanken zwischen den gleichgroßen, entgegengesetzt gerichteten Höchstwerten + J und — J vollkommen gleichmäßig abläuft in derselben Weise, wie die Elongation oder auch die Geschwindigkeit einer Pendelkugel mit der Zeit sich ändert.

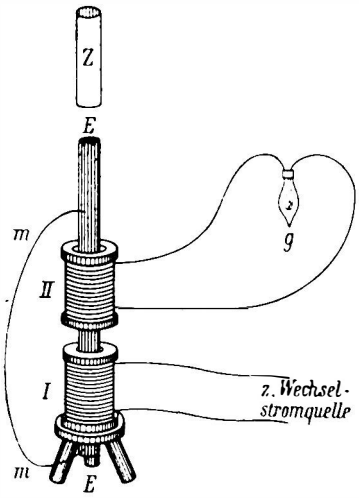


Abb. 79.
Induktion durch Wechselstrom.

Wir werden die Höchstwerte von Wechselstromstärken öfter auch kurz Stromstärke nennen, ebenso die Höchstwerte von Wechselspannungen kurz Spannung.

381. Die selbsttätigen Induktionswirkungen der Wechselströme können am besten mit der in Abb. 79 dargestellten Vorrichtung gezeigt

[1]) Es ist der Strom $i = J \sin pt$, wobei J der Höchstwert der Stromstärke und $p = 2\pi/T = 2\pi n$ ist, wenn T die Dauer einer Periode und $n = 1/T$ die Periodenzahl (in der Zeiteinheit) ist. Man sehe als Erläuterung zu dieser Darstellung des Wechselstroms die Betrachtung des ganz gleichen Falles der Elongation eines Pendels als Funktion der Zeit im Anhang M I a (Bd. I), außerdem weiter Anhang E III a.

werden. Die Primärspule I, welche Wechselstrom von einer Maschine erhält, ist mit dem Eisenkern E E versehen, der nach oben auf längerer Strecke aus ihr hervorragt. Letzteres bewirkt, daß die Magnetkraftlinien auf größeren Raum oberhalb der Spule sich verteilen, indem das Eisen sie aus dem Spuleninneren eine Strecke weit hinaufleitet, worauf sie seitlich verteilt in die Luft austreten, um zum unteren Spulenende zu gelangen, wie es bei einer derselben, m m, dargestellt ist. Diese Kraftlinien fahren beständig am Eisenkern auf und ab, durchschneiden dabei die Windungen der Sekundärspule II und induzieren so Strom in ihr, was durch Leuchten der Glühlampe g ersichtlich wird. Der Strom ist am stärksten bei tiefster Stellung der Spule II, dicht an I; ganz oben ist er schwach, weil nicht viele Kraftlinien bis hinauf sich ausbreiten. Der Eisenkern ist ein Drahtbündel, damit nicht auch in ihm Ströme induziert werden, was Energie verzehren und ihn heiß machen würde (vgl. 375).

Um den zeitlichen Verlauf des induzierten Stromes in II zu übersehen, ist zuerst die induzierte elektromotorische Kraft zu beachten, welche nach dem Induktionsgesetz (341) durch die Kraftlinienschnitte gegeben ist; ihr Verlauf ist in der Linie II a der Abb. 80 (vgl. 380) zu sehen.

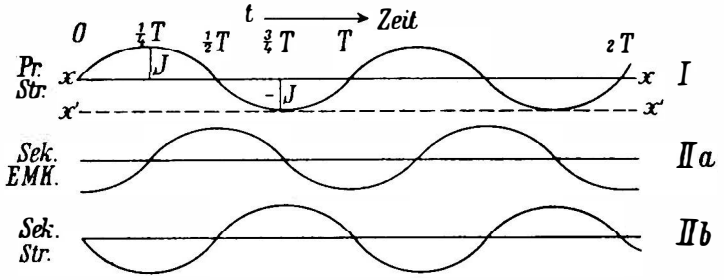


Abb. 80. Phasenverschiebung (Verspätung) des induzierten Wechselstroms.

Die elektromotorische Kraft ist Null bei T/4 und 3T/4, weil da der primäre Strom (Linie I) einen Augenblick ungeändert bleibt, seine Kraftlinien also ruhen. Zwischen diesen beiden Zeiten sind die Kraftlinien in Bewegung; sie gehen während der Strom absinkt, bis T/2, herunter, dann, während der entgegengesetzte Strom ansteigt, herauf, aber mit entgegengesetzter Richtung, und beides hat nach dem elektrodynamischen Zusammenhang die gleiche Wirkung, nämlich dem absinkenden Primärstrom gleichgerichtete (dem ansteigenden entgegengesetzten Strom entgegengerichtete), daher in der Linie II a nach oben aufzutragende Kraft. Die schnellste Bewegung der Kraftlinien findet zur Zeit T/2 statt, weil da der Strom am schnellsten sich ändert, was an der größten Steilheit der Linie I zu sehen ist; daher hat zu dieser Zeit T/2 die elektromotorische Kraft ihren Höchstwert. Ebenso findet man den übrigen Verlauf der Linie II a. Daß der Verlauf wieder genau sinusförmig ist, wie der des induzierenden Stromes, nur um $^1/_4$ Periodendauer verschoben, wie es die Linie II a darstellt, dies zeigt auch eine einfache Rechnung nach dem Induktionsgesetz[1]).

Zu bemerken ist, daß ganz derselbe Verlauf der sekundären elektromotorischen Kraft sich ergäbe, wenn der primäre Strom durch die Linie I, aber mit der Nullinie des Stromes bei x' x' statt bei x x gegeben wäre oder auch mit beliebig tiefer gelegener Nullinie. Denn es kommt, wie die vorige Überlegung zeigt, überall nur auf die Steilheit der Stromlinie I an, nicht auf ihre Höhenlage. Man sieht daher, daß ein unterbrochener oder auch schwankender Gleichstrom dieselben induzierenden Wirkungen ausüben muß, wie ein Wechselstrom derselben Form. So gelten die hier weiter folgenden Überlegungen und Ergebnisse auch für den Induktor mit dem Stromunterbrecher (Abb. 69), nur mit dem Unterschied, daß für denselben die Primär-

[1]) Siehe Anhang E IIIa.

stromlinie nicht sinusförmig ist, worauf wir noch zurückkommen (394). Man sieht aber, daß zu Volta-Induktion der Wechselstrom ein einfacherer Ersatz ist für den erst noch intermittierend zu machenden Gleichstrom.

382. Wirkung der Selbstinduktion im Sekundärleiter. — Um aus der durch die Linie IIa gegebenen induzierten elektromotorischen Kraft die Stromstärke im sekundären Leiter II zu erhalten, ist Ohms Gesetz anzuwenden; dabei ist zu bedenken, daß die Kraft IIa nicht allein vorhanden ist, weil die Kraft der Selbstinduktion im Leiter II nicht fehlen kann, da der Strom in ihm unzweifelhaft veränderlich sein wird. Es tritt somit hier ganz die schon früher überlegte Gleichung 363 in Kraft, die in Ohms Gesetz neben der von außen angelegten Spannung V auch die Selbstinduktion vorsieht, und zwar ist im gegenwärtigen Falle die von außen kommende Spannung nach der Linie IIa veränderlich. Damit ist die Gleichung zur Lösung aller Fragen der Stromstärke in dem durch Sinus-Wechselstrom induzierten Leiter gegeben.

Man überlegt dem Sinn der Gleichung nach — Selbstinduktion und Ohms Gesetz — schon vor ihrer mathematischen Behandlung das Folgende: Die Selbstinduktion im sekundären Leiter muß Verspätung des Stromes hinter der ihn treibenden elektromotorischen Kraft bewirken; denn sie bedeutet Trägheit des in Bewegung zu setzenden elektromagnetischen Feldes des Stromes (366 u. f.), und die Verspätung muß hier, beim Wechselstrom, dessen Feld fortdauernd Bewegungsänderung erfährt, fortdauernd wirken, nicht nur — wie bei Gleichstrom — bei Beginn und beim Aufhören des Stromes. Außerdem muß die Selbstinduktion auf die Stärke des induzierten Stromes Einfluß haben und zwar im Sinne einer Verminderung der Stromstärke. Denn die Verzögerung des Ansteigens des Stromes läßt ihn keine große Intensität annehmen, ehe nicht schon die entgegengesetzt wirkende Kraft einsetzt, und es muß dies um so mehr der Fall sein, je schneller die Wechsel aufeinander folgen. Die Selbstinduktion des sekundären Leiters muß also auf seine Stromstärke vermindernd einwirken, d. i. im selben Sinne wie nach Ohms Gesetz der Widerstand des Leiters, und zwar mit steigender Wechselzahl in erhöhtem Maße. Hiernach ist schon ersichtlich, welcher Art Funktion der Zeit die gesuchte sekundäre Stromstärke sein muß. Es kommt dann darauf an zu sehen, wie die Funktion im einzelnen gestaltet werden muß, um der schon angegebenen maßgebenden Gleichung zu genügen, was nur mehr eine rein mathematische Aufgabe ist[1]). Folgendes ist das Ergebnis:

1. Die Verspätung des sekundären Stromes gegen die ihn erzeugende Spannung ist um so größer, je größer die Selbstinduktion des Leiters und je größer die Periodenzahl des Wechselstromes ist; bei genügend großer Periodenzahl und nicht großem Widerstand beträgt die Verspätung ¼ Periode.

2. Die maximale Stromstärke ist $J = V/\sqrt{w^2+p^2L^2}$, wobei V die maximale elektromotorische Kraft, p ihre 2π-fache Wechselzahl, w der Widerstand und L die Selbstinduktion des Leiters ist. Es tritt also bei Wechselstrom an Stelle des Widerstandes w im Nenner von Ohms Gesetz die Quadratwurzel, in welcher neben w auch die Selbstinduktion L als bestimmend für die Stromstärke auftritt. Der Fall des Gleichstroms ist hierin einbegriffen; denn für diesen ist die Wechselzahl und damit $p = 0$, womit die Wurzel den Wert w erhält. Je größer die Periodenzahl und also p ist, desto weniger macht w als Summand unter der Wurzel aus, desto mehr kommt es also auf die Selbstinduktion L allein an. Bei sehr großem p tritt geradezu pL an die Stelle von w als bestimmend für die Stromstärke.

Beides, die Verspätung des Stromes und die Gleichung für seine Stärke gilt übrigens nicht nur für die hier betrachtete sekundäre Spule, sondern ganz

[1]) Sie ist im Anhang E IIIb durchgeführt.

allgemein (s. 388, 389, 392), wenn eine Wechselspannung V irgendwelchen Ursprungs an einen Leiter gelegt ist, insofern das Magnetfeld des Leiters mit seinem trägen Energieinhalt in Hin- und Herbewegung versetzt werden muß (vgl. 391).

383. Diese und viele weitere Ergebnisse aus dem Induktionsgesetz und Ohms Gesetz sind durchaus bestätigt und sind auch vielfach in technischer Anwendung, da Wechselstrom häufig benutzt wird. Es folgen hier einige auffallende bestätigende Beobachtungen mit Erläuterungen über weiter zu folgernde Besonderheiten der Wechselströme (383—393).

Beträgt die Verspätung des Stromes in der sekundären Spule ¼ Periode (382) gegen die elektromotorische Kraft, welche wir durch die Linie IIa in Abb. 80 darstellten (381), so gilt für den Strom die Linie IIb, und man sieht bei Vergleichung mit der Linie I, daß der sekundäre Strom dem primären dauernd entgegengesetzt ist. Entgegengesetzte Ströme stoßen aber einander ab (321), und in der Tat bemerkt man, daß die Spule II in Abb. 79, wenn genügend starker Wechselstrom in I ist, entgegen ihrem Gewicht zu schweben geneigt ist. Ein Metallzylinder Z, der weniger Selbstinduktion und weniger Widerstand hat als die Spule mit der Glühlampe, also stärkere Ströme zuläßt, an Stelle der Spule über den Eisenkern gesteckt, schwebt dauernd etwa in halber Höhe des Kerns; leichtere Metallringe werden bei plötzlichem Schluß des Stromes in I sogar hoch in die Luft geschleudert. — Alles sehr augenscheinliche Nachweise der entgegengesetzten Richtung von primärem und sekundärem Wechselstrom.

384. Elektrodynamische Schirmwirkung. — Wenn aber die beiden Ströme entgegengesetzt sind, so sind es auch ihre Magnetfelder, und dieselben vernichten also einander mindestens teilweise; denn das tatsächlich vorhandene Magnetfeld ist nicht nur das schon eingehend betrachtete des Primärstroms allein (381), das den sekundären Strom induziert, sondern dieser hat sein eigenes Feld, das hinzukommt. Diese gegenseitige Vernichtung der Felder der beiden Leiter wird dadurch merklich, daß ein dritter, noch hinzugebrachter Leiter nur wenig oder keine Induktionswirkung erfährt. Ist der Zylinder Z (Abb. 79) über dem Eisenkern und schiebt man dann über diesen noch die Spule II als dritten Leiter, so bleibt die Glühlampe g dunkel, auch wenn Z und II ganz unten dicht an I gehalten werden. Zieht man nun den Zylinder Z allmählich in die Höhe, so daß der Raum zwischen dem Eisenkern und der Spule II frei wird, so beginnt die Glühlampe wieder zu leuchten; Herabdrücken des Zylinders bringt sie wieder zum Erlöschen.

Man kann dies Ergebnis als Schirmwirkung bezeichnen. Der Leiter Z schirmt die vom Eisenkern ausgehende Induktionswirkung vom Leiter II ab; er tut dies vermöge der Ströme, die in ihm selbst entstehen und die das Magnetfeld hinter ihm vernichten. Ein nicht ganz zum Zylinder zusammengebogenes oder auch durch ein eingeschobenes Papierblatt an leitender Berührung seiner übereinandergehenden Ränder verhindertes Blech, ebenso etwa ein Glaszylinder schirmen gar nicht ab, weil sie im Kreise um den Eisenkern gerichtete Ströme, wie sie induziert werden, nicht zulassen.

Diese Schirmwirkung erinnert an die elektrostatische, sowie auch an die magnetische Schirmwirkung (43, 252), man nennt sie zum Unterschied von diesen

elektrodynamische Schirmwirkung. Alle drei Schirmwirkungen bestehen in der Freihaltung eines Raumes von Kraftlinien, seien es ruhende elektrische, ruhende magnetische oder, wie hier, bewegte magnetische Kraftlinien.

385. *Hauteffekt.* — Die Bewegungen der an den schirmenden Leiter herankommenden Magnetkraftlinien können nicht weit in dessen Inneres fortschreiten. Denn sobald sie den Leiter zu schneiden beginnen, induzieren sie Ströme, die Gegenfeld machen, und wenn dadurch das eindringende Feld noch nicht gleich ganz vernichtet ist, so geschieht dies doch in wenig tieferen Schichten des Leiters, wo der Rest des Feldes weiter Ströme induziert, die weiter Gegenfeld machen. Man sieht daraus, daß der schirmende Leiter *auch sein eigenes Innere schirmt* und daß die in ihm induzierten *Ströme überhaupt nur in einer Oberflächenschicht von gewisser Dicke laufen*, während das Innere stromlos bleibt. Man nennt dies „Hauteffekt". Die Schichtdicke wird um so kleiner, der Hauteffekt um so hervortretender, je besser der Stoff leitet und je höher die Wechselzahl des herankommenden Magnetfeldes ist. Denn mit dem Leitvermögen steigt die Stromstärke und damit auch das Gegenfeld schon einer dünnen Schicht, und mit steigender Wechselzahl wird die Selbstinduktion zunehmend maßgebend für den Stromlauf.

Derselbe Hauteffekt zeigt sich auch bei Fortleitung von Wechselströmen durch Drähte[1]). Denn auch diese gewöhnliche Stromleitung ist, wie schon öfter bemerkt (93, 125, 161), ein von außen her an die Drähte kommender Vorgang, bestehend im Entlanggleiten elektrischer Kraftlinien mit ihren Enden an den Drähten, wobei sie Magnetkraftlinien entwickeln (328, 368), die ebenso induzierend auf den Draht wirken wie die von einem benachbarten Primärleiter kommenden Kraftlinien. Zu quantitativer Verfolgung kann man den Hauteffekt als Verzweigung des Wechselstroms zwischen den einzelnen Teilen des Leiters auffassen (392).

386. *Energieübertragung von Leiter zu Leiter bei Wechselstrom.* — Eine Primärspule mit Wechselstrom ergibt in einer am selben Eisenkern befindlichen Sekundärspule ebenfalls ständigen Wechselstrom, wie es die betrachteten Beispiele zeigten (381 u. f.). Die Energie dieses sekundären Wechselstroms stammt aus dem Primärstrom (374); sie geht in Gestalt der Magnetkraftlinien des Primärstroms von dessen Leiter zum sekundären Leiter über (vgl. 391). Zu möglichst reichlichem Energieübergang ist dementsprechend die Entwickelung möglichst vieler Magnetkraftlinien, d. i. ein guter Eisenkreis (302, 308) erforderlich.

387. *Wechselstromumformer (Transformator).* — Solche Energieübertragung von einer primären Wechselstromspule auf eine sekundäre kommt in technischer Anwendung zur Geltung mit dem Zweck, die *Energie* des Wechselstroms bei dieser Übertragung auch nach Wunsch *umzuformen*. Die Umformung besteht in Änderung eines der beiden, die zeiteinheitliche Energiemenge bestimmenden Faktoren — Strom und Spannung (119, 216) — auf Kosten des anderen. Steigt der eine Faktor, so muß — bei der gegebenen Energiemenge — der andere nach dem Energiegesetz sinken (vgl. auch 388). Die in der Sekundärspule auftretende Spannung kann mittels deren Windungszahl beliebig einge-

[1]) Vgl. Anhang E V b, 9.

richtet werden; denn es steigt die Zahl der Kraftlinienschnitte und also auch die induzierte Spannung proportional der Windungszahl. Da mit Steigerung der Spannung die Stromstärke sinken muß, brauchen die vielen Windungen nur entsprechend dünnen Draht, so daß sie ebenso gut Platz finden wie wenige Windungen (für niedrige Spannung) mit dickem Draht (für den dann starken Strom). So können beispielsweise 10 Weber bei 100 Volt auf 1 Weber mit 1000 Volt transformiert werden, wenn die beiden Windungszahlen, primär und sekundär, wie 1:10 sich verhalten. Bei vertauschter Anschaltung leistet derselbe Transformator die umgekehrte Verwandlung. Solche Transformationen finden bei elektrischer Energieübertragung in die Ferne reichlich Anwendung (394).

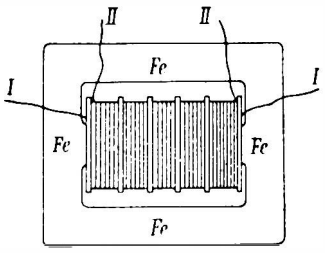


Abb. 81.
Transformator (Umformer) mit geschlossenem Eisenkreis.

Die beiden Spulen sind bei den technischen Umformern möglichst dicht, meist übereinander auf einen in sich geschlossenen Eisenkreis gewickelt (Fe, Abb. 81, vgl. auch 394); dies gibt möglichst viel Magnetkraftlinien und beste Ausnutzung derselben, so daß fast alle im primären Strom zugeführte Energie (vgl. 386) im sekundären sich findet (über 95 v. H.). Energieverluste in Wirbelströmen müssen durch Vermeidung benachbarter Metallmassen und Unterteilung des Eisenkerns ausgeschaltet sein (vgl. 375), Verluste beim steten Ummagnetisieren des Eisens durch geeignete Beschaffenheit desselben (258); es erscheint dann fast keine Energie als Wärme im Umformer.

388. Einfluß der Selbstinduktion auf die sekundäre Stromstärke. — Aus den allgemeinen Gesetzen war zu schließen (382), daß für die Intensität von Wechselströmen nicht der Widerstand w der Leitung allein maßgebend ist, sondern dieser zusammen mit der Selbstinduktion L der Leitung nach Maßgabe von $\sqrt{w^2+p^2L^2}$, wobei p die 2π-fache zeiteinheitliche Wechselzahl ist. Die Selbstinduktion wird hiernach um so einflußreicher gegenüber dem Widerstand, je höher die Wechselzahl ist. Man bemerkt diesen Einfluß der Selbstinduktion auf die Stromstärke, wenn man in dem schon benutzten Apparat Abb. 79 sekundäre Leiter mit verschiedenen Windungszahlen verwendet. Würde nur der Widerstand von Einfluß sein, so müßte die Stromstärke einer in sich geschlossenen Spule II gleich groß ausfallen bei viel und bei wenig Windungen; denn es steigt sowohl die induzierte Spannung als auch der Widerstand proportional der Windungszahl. Tatsächlich erhält man aber in einem einfachen über den Eisenkern gesteckten Drahtring die stärksten Ströme, was an der starken Erhitzung eines solchen Drahtringes merklich wird, wenn man ihn am Aufsteigen (383) verhindert; Spulen werden unter gleichen Umständen nicht so heiß, am allerwenigsten wenn sie viele Windungen haben. Es ist die Selbstinduktion, deren überwiegender Einfluß die Stromstärke bei steigender Windungszahl sinken läßt im selben Maße, in welchem die Spannung steigt. Denn die Selbstinduktion ist nicht der Windungszahl selber, sondern deren Quadrat proportional (361), wonach der Strom bei der der Windungszahl proportionalen Spannung verkehrt proportional der Windungszahl ausfallen muß[1]). Dies stimmt auch überein mit dem — nach dem Energiegesetz notwendigen — Sinken des Stromes bei steigender Spannung (vgl. 387).

389. Selbstinduktion wirkt immer wechselstromvermindernd. — Nicht nur in einem sekundären Kreis, wie bisher betrachtet, sondern ganz allgemein gilt für die Stärke J eines Sinuswechselstroms bei der Spannung V, dem Widerstand w und der Selbstinduktion L $J = V/\sqrt{w^2+p^2L^2}$, wenn p die 2π-fache Wechselzahl ist (382). Ist w klein gegen pL, was bei Spulen mit nicht zu dünnem Draht und einigermaßen schnellem Stromwechsel leicht vorkommt, so

[1]) Anhang E III c zeigt dies in eingehender Rechnung im Anschluß an Anhang III a und b auf Grund der Gesetze von Ohm, der Induktion und der magnetischen Kreise.

ist $J = V/pL$. Die Stromstärke hängt dann bei gegebener Spannung V ganz von der Selbstinduktion L ab.

Schaltet man an eine Wechselstromquelle mit konstanter Spannung eine Spule mit vielen Windungen und also großer Selbstinduktion, so kann nicht viel Strom entstehen; die Spule wirkt wie ein großer Widerstand, den sie aber gar nicht hat. Ist ein Strommesser in der Leitung, so daß die Stromstärke jederzeit ersichtlich ist, und senkt man einen Eisenkern in die eingeschaltete Spule, so sieht man sogleich die Stromstärke sinken, während doch der Widerstand vollkommen ungeändert geblieben ist; es ist die Vermehrung der Selbstinduktion der Spule durch das Eisen, die sie wechselstromundurchlässiger macht.

Man nennt eine Spule mit großer Selbstinduktion bei kleinem Widerstand in solcher Anwendung, zur Schwächung von Wechselstrom, „Drosselspule". Die Drosselspule kann auch zur Sonderung von Gleichstrom und Wechselstrom dienen; sie ist für ersteren durchlässig, hält aber letzteren ab.

390. Energieverbleib bei Stromschwächung durch Selbstinduktion und durch Widerstand. — Man kann nach Vorigem Wechselstrom ebenso gut durch Einschaltung von Selbstinduktion — durch eine Drosselspule — regulieren, wie durch Einschaltung von Widerstand. Ein wesentlicher Unterschied ist aber doch vorhanden zwischen beiden Fällen. Der Widerstand verbraucht Energie, indem er sie als Stromwärme, die er in sich entwickelt, verloren gehen läßt; die Selbstinduktion, die Drosselspule, verbraucht aber keine Energie, sondern sie beläßt sie in der Stromquelle oder zu weiterer Verwendung.

Beide Fälle sind nach Maßgabe des energiebemessenden Produktes aus Spannung und Stromstärke zu überlegen. Spannung und die verminderte Stromstärke mögen in beiden Fällen gleich sein; ihr Produkt gilt aber als Energiemaß ohne weiteres nur für den Fall des Widerstandes; für die Selbstinduktion ist nicht zu vergessen, daß sie den Strom gegen die Spannung verspätet (382) und daß nur das Produkt gleichzeitiger Werte von Strom und Spannung Energie bedeutet. Die Energieberechnung für solche Fälle der Ungleichzeitigkeit von Strom- und Spannungswechseln muß daher für jedes Zeitelement besonders ausgeführt und dann über die ganze Zeit summiert werden. Es sind dafür besondere Rechenregeln ausgearbeitet, die aber nichts Neues bieten. Für den hier betrachteten Fall genügt es, je ¼ Periodendauer gesondert zu bedenken, was an der Hand der Linien II a und II b der Abb. 80 geschehen kann, welche die um T/4 auseinanderliegenden Verläufe von Spannung und Strom darstellen. Man sieht, daß von 0 bis T/4, sowie auch von T/2 bis 3T/4 beide Faktoren gleiches Vorzeichen haben, also das Produkt positiv ist, daß aber in den beiden anderen Vierteln gleichgroße negative Produkte sich ergeben, woraus hervorgeht, daß die Summe aller Produkte über die ganze Zeit 0 bis T und so auch weiterhin Null und damit auch die ganze Energieübertragung in die Spule Null sein wird. Die Energie schwankt nur abwechselnd in die Spule hinein und wieder aus ihr heraus.

Man sieht daraus, daß man Wechselstrom viel günstiger, nämlich ohne Energieverluste, regulieren kann als Gleichstrom.

391. Kraftlinien- und Energiebewegungen um eine Wechselstromspule. — Der fehlende Energieverlust in einer Drosselspule (ohne Sekundärwindungen, 390) hängt mit dem wegen des genügend dicken Kupfers fehlenden Widerstand zusammen. Die Enden der elektrischen Kraftlinien am Draht werden so nicht zurückgehalten bei ihrem Entlanggleiten; sie kommen daher nicht in die zum Leiter geneigte Lage (330), in welcher nach dem elektrodynamischen Zusammenhang ihre Energie in den Leiter hineinsinken müßte, wo sie als Wärme aufträte, weil die schiefen Enden der elektrischen Kraftlinien die Elektronen und die Atome des Metalles in Bewegung setzten. Wohl aber geht die Energie der elektrischen Kraftlinien in solcher Spule stark in magnetische Energie über (368), weil guter magnetischer Kreis (302) vorgesehen ist. Die Energie der magnetischen Kraftlinien geht aber nicht verloren, sondern diese Kraftlinien ziehen sich bei beginnender Stromumkehr wieder in die Spule zurück, wobei auch die Richtung der Energiebewegung sich

umkehrt, die aber parallel dem Leiter bleibt, wie es der elektrodynamische Zusammenhang ergibt[1]). Dies ist das schon betrachtete Ein- und Auswandern der Energie (390).

Ist dagegen die betrachtete Spule mit sekundären Windungen versehen, in welchen sie Strom induziert, wie in einem Transformator (387), so ist die Bewegung der Magnetkraftlinien eine andere. Sie gehen dann dauernd vom primären Leiter, aus dem sie herauskommen, zum sekundären Leiter hinüber, in den sie hineingehen. Die elektrischen Kraftlinien verbinden dauernd beide Leiter, an denen sie entlanggleiten, so die beiden einander entgegengesetzten Ströme (383) gebend. Elektrische wie magnetische Kraftlinien kommen dabei mit dauernd wechselnden Richtungen neu heran, wie es der Periode des Wechselstroms entspricht; aber die Energie wandert, entsprechend dem elektrodynamischen Zusammenhang, immer in gleicher Richtung: von der Stromquelle in die primäre Leitung, von dieser in Gestalt der Magnetkraftlinien hinübergleitend an die sekundäre Leitung und an dieser weiter bis zur etwaigen Verbrauchsstelle, wo sie andere Form annehmen kann.

Wegen der dauernd gleichgerichteten Bewegung der Energie in diesem Falle des Vorhandenseins eines sekundären Stromkreises fehlt hier auch die Verspätung des primären Stroms gegen die ihn treibende Spannung; es sind keine Energiemassen hin und her zu beschleunigen. Ist aber der sekundäre Kreis offen oder nicht vorhanden, so tritt die schon betrachtete Verspätung (382) als Wirkung der Trägheit der Energiemassen ein.

Das Wegfallen der Verspätung des Primärstromes bei steigender Entwickelung eines sekundären Stromes, durch Widerstandsverringerung in dessen Kreise, ergibt sich auch aus den Gleichungen nach Ohms Gesetz und dem Induktionsgesetz, wenn man sie gleichzeitig auf beide Kreise anwendet[2]).

Man sieht, daß der Wechselstromumformer die Energie immer nur in dem Maße der Stromquelle entnimmt, als sie im Sekundärkreis zum Verbrauch kommt; die für die Energieaufnahme bestimmende Stromverspätung in der Primärwickelung richtet sich selbsttätig hiernach ein.

392. Verzweigung von Wechselstrom. — Wird eine Wechselstromleitung verzweigt, so haben die Zweige an ihren leitend aneinandergrenzenden Enden gleiche Spannung; es gilt daher für die Zweige nach Ohms Gesetz, wie schon früher geschlossen (167), daß ihre Stromstärken umgekehrt proportional den hier an Stelle der Widerstände tretenden Quadratwurzelgrößen $\sqrt{w^2+p^2L^2}$ (382) sein müssen. Bei überragender Selbstinduktion ist darnach auch hier wieder diese so gut wie allein maßgebend.

Man kann dies sehr augenfällig an der früher schon benutzten Vorrichtung, Abb. 75 (360), beobachten, wenn man an Stelle der Elemente V eine Wechselstromquelle setzt und den Quecksilberunterbrecher q fortläßt. Es verzweigt sich dann der Strom einerseits über die große Selbstinduktion des Elektromagneten L und anderseits über den großen Widerstand der Glühlampe g. Gleichstrom, der nur nach den Widerständen sich richtet (167), geht fast ganz über den Elektromagneten L, was an dessen starker Kraftentwickelung zu merken ist, während die Glühlampe g dunkel bleibt. Wechselstrom dagegen läßt die gute, dicke Kupferleitung des Magneten fast unbenutzt und bevorzugt die Glühlampe trotz ihres großen Widerstandes, weil sie kaum Selbstinduktion hat. Man bemerkt dies daran, daß der Magnet nicht viel Kraft zeigt, die Lampe aber hell glüht. Noch heller glühend wird die Lampe, wenn der Magnet seinen Eisenanker aufliegen hat, weil er dann vermöge noch vergrößerter Selbstinduktion den Weg des Stromes fast ganz sperrt. Ist ein Strommesser in den unverzweigten Teil der Leitung geschaltet, so zeigt er bei Gleichstrom leicht sehr hohe Stromstärken bei

[1]) Es ist für solche Überlegung nützlich, stets ein Modell des elektrodynamischen Zusammenhangs (329, Abb. 63) bei der Hand zu haben.

[2]) Es geschieht dies in derselben Weise, wie es für einen Kreis allein im Anhang E III b durchgeführt ist.

gar nicht hoher Spannung der Stromquelle, wegen des sehr kleinen Widerstandes des Magneten; Wechselstrom dagegen bleibt immer nur ganz schwach, weil ihm fast nur der Weg über den hohen Widerstand der Glühlampe offen steht.

Wir haben früher (360) dieselbe Stromverzweigung mit Gleichstrom und dem Unterbrecher q benutzt, ganz wie in Abb. 75 dargestellt, und haben das Aufleuchten der Glühlampe g bei Schließung und bei Öffnung des Stromes beachtet. Wiederholt man Schließen und Öffnen dauernd abwechselnd durch Auf- und Abbewegen des Stiftes in q, so leuchtet die Lampe andauernd, wie mit Wechselstrom. Es ist dies nur die schon früher betrachtete Extrastromwirkung; jedoch sieht man hierbei wieder (vgl. 381), daß intermittierender Gleichstrom und Wechselstrom in bezug auf Induktion einander gleich sind.

Man kann auch die schon betrachtete Bevorzugung der Oberflächenschichten wechselstromleitender Drähte, den Hauteffekt (385) als Verzweigungserscheinung auffassen. Der Draht kann in Fäden gleichen Widerstands gespalten gedacht werden, zwischen welchen der Wechselstrom sich verzweigt; er benutzt mehr die äußeren Fäden, weil diese weniger Selbstinduktion besitzen als die inneren. Die äußeren Fäden sind nämlich im Mittel weiter von den anderen Fäden entfernt als die inneren, und die verschiedenen Fäden induzieren einander in derselben Weise durch Kraftlinienschnitte wie es bei parallelen Drähten schon betrachtet wurde (334).

393. Drehstrom (Mehrphasenstrom). — Mit diesem Namen bezeichnet man eine Verbindung mehrerer Wechselströme gleicher Periodenzahl, aber verschiedener Phase, d. i. verschiedener augenblicklicher Intensität. Drehstrom braucht zur Fortleitung mehr als zwei Drähte. Abb. 82 (oberer Teil) zeigt den Verlauf eines 4-Phasenstroms in seinen 4 Drähten a, b, c und d in der schon in Abb. 80 I benutzten Darstellungsweise (380). Die Zeiten 0 bis 4 umfassen eine Periode. Man sieht, daß voller Strom in positiver Richtung im Leiter a zur Zeit 0, in den folgenden Leitern aber je ¼ Periode später vorhanden ist.

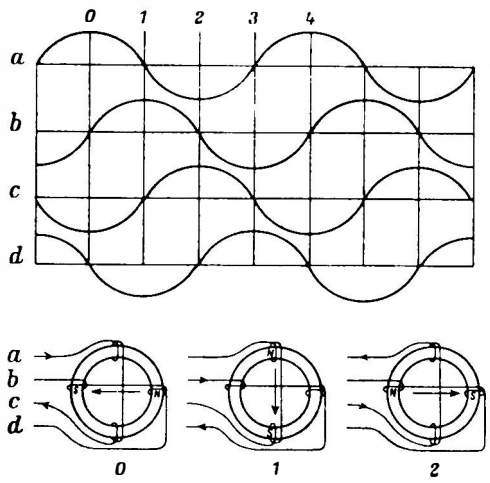


Abb. 82. Drehstrom.

Zur Erzeugung eines solchen Vierphasenstroms erhält der Läufer der Maschine (378) 2 Wickelungen im Winkel von 90° zu einander; die 4 Enden dieser Wickelungen sitzen an 4 Schleifringen der Achse, und von den 4 Bürsten dieser Ringe gehen die 4 Drähte a b c d aus. Man sieht an Abb. 82, daß a und c zusammen als Hin- und Rückleitung eines und desselben Stromes aufgefaßt werden können, wie es nach dieser Erzeugung auch sein muß; ihre Ströme sind stets einander entgegengesetzt gerichtet und werden zu gleichen Zeiten Null. Ebenso bei b und d. Diese Drahtpaare müssen dementsprechend bei Stromschluß an der Gebrauchsstelle miteinander verbunden werden; man kann aber ebensogut auch alle 4 Drähte miteinander verbinden.

Drehstrom bietet mancherlei Vorteile gegenüber dem einfachen Wechselstrom; ein besonderer Vorteil ist die große Eignung zum Treiben von Motoren, wonach wohl auch der Name „Drehstrom" gewählt ist. Drehstrommotoren sind die einfachsten möglichen Elektromotoren. Der untere Teil von Abb. 82 zeigt den Grundgedanken. Der Feldmagnet (Ständer) des Motors ist ein (zur Vermeidung von Wirbelströmen unterteilter) Eisenring, der im Falle des Vierphasenstroms 4 um 90° voneinander abstehenden Wickelungen hat, die so miteinander und mit den 4 Zuleitungen a b c d verbunden sind, wie es die Abbildung zeigt. Man kann nun für jeden Augenblick die Magnetisierung des Ringes nach der Hand- oder Uhrzeiger-Regel (276, 303) überlegen, indem man die gerade vorhandenen Ströme aus den 4 Kurven entnimmt. Man findet, daß der Ring zu jeder Zeit so mit Kraftlinien versehen ist, wie zwei, seine Hälften bildende Hufeisenmagnete, die mit gleichen

Polen zusammenstoßen, so daß die in der Luft von Pol zu Pol gehenden Kraftlinien stets in einen Durchmesser des Ringes fallen. Dieser Durchmesser dreht sich aber beständig im Kreise herum, wie es die Abbildung für die Zeiten 0, 1 und 2 zeigt. Der Pfeil im Ring gibt überall die Richtung der magnetischen Kraft im betreffenden Augenblick an; diese Richtung dreht sich während jeder Wechselstromperiode einmal im Kreise herum. Eine im Ring befindliche Magnetnadel würde diese beständige Kreisdrehung ausführen und das Vorhandensein des so entstehenden „magnetischen Drehfeldes" anzeigen. In diesem Drehfeld befindet sich der Läufer des Motors. Er könnte ein fast beliebiger Metallkörper ohne alle Zuleitungen und Schleiffedern sein; denn es werden durch die ständigen Kraftlinienschnitte, denen er ausgesetzt ist, Ströme in ihm induziert, die so gerichtet sind, daß sie die sie erzeugende Bewegung — die des Drehfeldes also — zu hemmen suchen (370). Der Läufer zieht also das Drehfeld zurück; dieses aber, festgehalten am Ständer, treibt den Läufer mit der zugehörigen Gegenkraft voran, und dies gilt fortdauernd, solange der Läufer nicht die volle Drehgeschwindigkeit des Drehfeldes hat. Für beste Wirkung wird zur Aufnahme der induzierten Ströme ein gut leitender in sich geschlossener Kupferweg, eine „Kurzschlußwickelung" am Eisenkörper des Läufers angebracht; es kommt dabei, wie der elektrodynamische Zusammenhang zeigt, auf Kupferweg senkrecht zur Zeichnungsebene der Abb. 82, d. i. parallel zur Achse des Läufers an dessen Umfang an. Man bemerkt, daß der Läufer eine Variation des schon an der gedrehten Metallscheibe mit der Magnetnadel betrachteten Vorganges (371) bietet.

Zur technischen Anwendung, besonders bei Leitung in die Ferne, wird Dreiphasenstrom benutzt, der mit nur 3 Drähten in leicht verständlicher Weise dasselbe leistet, wie der hier betrachtete Vierphasenstrom.

Die Einfachheit des Drehstrommotors, zusammen mit der sogleich noch zu erläuternden Eignung der Wechselströme zur Fortleitung in große Ferne (394), verleiht dem Drehstrom seine besondere Bedeutung für die elektrische Energieübertragung im großen.

394. Erzeugung höchster Spannungen mittels Induktion. — So wie die stärksten Ströme liefert Induktion auch die höchsten Spannungen, weit höhere als die älteren Mittel, Reib- und Influenzmaschine in ihrer bisherigen Ausbildung.

Durch Magnetinduktion, mit Dynamomaschinen (375), können allerdings nicht viel über 3000 Volt erreicht werden, weil die entsprechende Isolation der nötigen großen Windungszahlen dünner Drähte schwer den Zentrifugalkräften der erforderlichen großen Drehzahlen standhält.

Man muß daher zur Voltainduktion greifen, was das Vorhandensein geeigneter Primärströme voraussetzt. Dies führt zunächst zurück zum einfachen Induktor (347) mit zwei Spulen und einem Stromunterbrecher, wie in Abb. 69, nur daß jetzt die Sekundärspule außerordentlich hohe Windungszahlen dünnsten, bestisolierten Drahtes erhält und außerdem so dicht, als es die erforderliche Isolation gestattet, über die Primärspule gewickelt sein muß, um deren Kraftlinien möglichst auszunutzen. Man baut so „Induktorien" mit großen Abmessungen für fast beliebig hohe Spannungen. Der als Drahtbündel unterteilte Eisenkern (vgl. 374) füllt das Innere der Primärspule. Ein geschlossener Eisenkreis ist mit unterbrochenem Gleichstrom in der Primärspule nicht benutzbar; seine größere Kraftlinienzahl käme nicht zur Geltung, weil sie infolge Remanenz des Eisens bei Stromöffnung nicht verschwände und also nicht zu induzierenden Schnitten käme. Wohl aber kommt der geschlossene Eisenkreis bei Anwendung von Wechselstrom zur Geltung in der technischen Form des Induktoriums, dem „Hochspannungstransformator" (s. 387); der Wechselstrom erzwingt nicht nur Entmagnetisierung des Eisens, sondern dauernde Ummagnetisierung desselben.

Viel Sorgfalt verlangt die Isolation in der Sekundärspule großer Induktorien; sie muß gegenüber den hohen Spannungen, die da induziert werden, vollkommen durchschlagsfest sein. Es wäre nicht gut möglich, dies bei einer langen Spule zu erreichen, wenn jede Windungslage über ihre ganze Länge ginge; denn es kämen dann an den Spulenenden Drähte in große Nachbarschaft, zwischen welchen die große Windungszahl zweier Lagen und also auch entsprechend hohe Spannung ist. Daher unterteilt man die Sekundärspule, wie es in Abb. 81 auch an einem Wechselstromumformer für höhere Spannung zu sehen ist; die zwischenliegenden Scheiben trennen stark gegeneinander gespannte Teile genügend durchschlagsfest voneinander. Ist die meist aus Schellack und anderen Harzen bestehende Isolation eines Induktoriums einmal von einem Funken durchschlagen, so ist es unbrauchbar geworden; man versenkt daher den technischen Umformer für hohe Spannung lieber unter Öl, das bei guter Isolation große Durchschlagsfestigkeit haben kann und außerdem einmal gebildete Funkenkanäle wieder füllt („Öltransformator").

Der bei Benutzung von Gleichstrom nötige Unterbrecher muß möglichst schnelle Stromöffnung besorgen; auf die Schließungswirkung wird verzichtet, da der Strom wegen der notwendig großen Selbstinduktion der Primärspule nur langsam ansteigen kann, so daß dabei nur geringe Sekundärspannung entsteht. Die schnelle Unterbrechung des Stroms darf durch den Extrastromfunken an der Unterbrechungsstelle (359, 360), der nochmals leitende Verbindung schafft, nicht gestört werden. Man verlegt daher die Unterbrechungsstelle unter eine schlechtleitende und durchschlagsfeste Flüssigkeit und schaltet außerdem einen Kondensator von geeigneter Kapazität an die beiden Seiten der Unterbrechungsstelle, um die Spannung des Extrastroms herabzusetzen. Der Flüssigkeitsunterbrecher (218) wirkt auch ohne Kondensator gut. Wechselstrom kann ohne weiteres angewandt werden.

Mit großen Induktorien, deren sekundäre Drahtlängen viele Kilometer betragen, mit entsprechend großen Windungszahlen und Spulenlängen von 1 m und mehr, erreicht man Spannungen von Millionen von Volt, entsprechend Funken, die zwischen positiver Spitze und negativer Platte fast die volle Spulenlänge erreichen.

Technische Wechselstromumformer (387) erzeugen mit hohen Windungszahlen Spannungen von mehreren 100000 Volt zum Zweck der elektrischen Energieübertragung auf große Entfernungen. Je höher die Spannung, desto schwächer kann der Strom für Übertragung einer gegebenen Energiemenge sein, desto weniger Kupfer ist für die Leitungen erforderlich und desto geringer werden die dem Quadrat der Stromstärke und dem Widerstand proportionalen Energieverluste durch Stromwärme in den Leitungen (164, 377).

Eben wegen der Möglichkeit, mit Wechselstrom durch Umformung verhältnismäßig einfach zu hohen Spannungen zu kommen, findet alle *Energieübertragung auf große Entfernungen* mit Wechselstrom (meist Drehstrom, 393) statt, der auch am Empfangsort ebenso einfach die Möglichkeit der Umformung auf beliebig niedrige Spannung mit entsprechend hoher Stromstärke bietet (387, 388).

Lange vor diesen technischen Benutzungen war das Induktorium schon in wissenschaftlichen Anwendungen sehr ergiebig; in der Tat ist die Anbahnung von allem, was von hier ab noch weiter folgt, nur durch das Induktorium als Spannungsquelle ermöglicht worden.

4. Elektrische Schwingungen und Wellen.

Schwingungen.

395. Eine *elektrische Schwingung* ist ein Vorgang des Hin- und Herströmens von Elektrizität an einem Leiter — wie der Wechselstrom —, mit der Besonderheit aber, daß die Periodendauer nicht durch eine periodisch wirkende

Stromquelle, sondern durch die Beschaffenheit des Leiters selbst und seiner Umgebung bedingt ist.

Eine elektrische Schwingung läuft auch nicht in geschlossenem Kreise, sondern für sie ist der offene Leiter charakteristisch, an dem sie im einfachsten Falle von Ende zu Ende hin und herlaufen kann. Es kommen hier die Besonderheiten ungeschlossener Ströme mit den Wirkungen der Elektrizitätsanhäufungen an den Leiterenden, welche sie mit sich bringen, zum Ausdruck in neuartigen Erscheinungen.

Einen guten Vergleich einer elektrischen Schwingung mit einem mechanischen Vorgang bietet eine schwingende, elastische Feder. Die Feder sei am einen Ende befestigt; am anderen Ende trage sie eine Masse (wie Abb. 35 in Bd. I). Wird die Feder gebogen und dann losgelassen, so führt sie mit der Masse an ihr die bekannte Schwingungsbewegung aus. Wir haben dieselbe untersucht (M 163) als Folge der Kraft, welche die Masse stets zur Gleichgewichtslage hintreibt, und der Trägheit, welche die bewegte Masse dort nicht ruhen läßt. Dieselbe Bewegung führt Elektrizität an einem Leiterstück aus, das beiderseits isoliert endet, wenn ein Überschuß freier Elektrizität erst am einen Ende angehäuft und dann losgelassen wird. Es ist die elektrische Spannung, welche eine einseitige Anhäufung der Elektrizität stets zur Gleichgewichtsverteilung über den Leiter treibt, und es ist die Selbstinduktion des Leiters, welche die gegen die Gleichgewichtsverteilung hin bewegte Elektrizität in dieser Verteilung nicht ruhen, sondern über dieselbe hinausgehen läßt.

Man bemerkt, daß die Auffassung der Selbinduktion als eine Trägheitserscheinung, welche wir bereits als vollkommen der Wirklichkeit entsprechend erkannt haben (366 u. f.), der Schlüssel zur Einsicht war, daß elektrische Schwingungen ein möglicher Vorgang sein müßten.

396. Schwingende Flaschenentladung. — Den ersten Fall der Erkennung des Auftretens elektrischer Schwingungen und eingehender Untersuchung derselben bot die Entladung von Kleistschen Flaschen. Diese Entladung ist kein so einfacher Vorgang, als die allerdings sehr kurze Dauer des entladenden Funkens früher leicht annehmen ließ; sondern die Ladung der Flasche schwankt in der kurzen Entladungszeit unter günstigen Umständen oftmals hin und her, ehe der Endzustand ruhender Elektrizität eintritt.

Der nach dem eben Bemerkten mit Recht zu erwartende Vorgang ist folgender: Die Flasche (Abb. 83) sei mit dem Entladungskreis L versehen, welcher die beiden Belegungen über die Funkenstrecke F verbindet. Zum Laden seien die beiden Kugeln F mit einer Spannungsquelle — Influenzmaschine oder Induktorium — verbunden. Es wird dabei der Flasche Energie zugeführt, gleich wie der Feder (395) beim Biegen. Ist die Spannung so hoch gestiegen, daß bei F der Funke überspringen kann, so beginnt die Entladung; das Auftreten des Funkens ist hierbei der Auslösungsvorgang, welcher die Umwandlung aufgespeicherter Energie in andere Formen ermöglicht (vgl. M 150), gleich wie bei der gebogenen Feder das Loslassen. Der Funke ermöglicht — als leitende Luft (27) — beliebiges Strömen der Elektrizität von Belegung zu Belegung der Flasche; die durch das nichtleitende Glas der Flasche getrennten Belegungen sind die Enden des vorgesehenen Leitungsweges der Elektrizität. Die Entladung beginnt mit dem Strömen der aufgehäuften Elektrizität von der einen Belegung

zur anderen über die leitend gewordene Luftstrecke F. Der Strom kann nur allmählich ansteigen wegen der Selbstinduktion in L; er kann aus gleichem Grunde aber auch nicht plötzlich aufhören, wenn die Entladung vollendet und damit die den Strom treibende Spannung verschwunden ist. Der Strom geht also über dieses Ziel hinaus, gleichwie die Feder über die Gleichgewichtslage hinausschwingt, und damit wird die Flasche umgeladen. War sie erst innen positiv und außen negativ geladen, so wird sie jetzt, ½ Schwingungsdauer später, außen positive und innen negative Ladung haben. Damit kommt aber der Strom, der die Entladung und Umladung bewirkt hat, zum Stillstand und dann sogar zur Umkehr, weil die Neuladung eine ihm entgegengerichtete Spannung besitzt, gleich wie die schwingende Feder zum Stillstand und zur Umkehr kommt, sobald sie genügend nach der anderen Seite gebogen ist. Es ist jetzt, im Augenblick des Stillstandes, die erste halbe Schwingungsdauer abgelaufen; der weitere Vorgang ist Wiederholung.

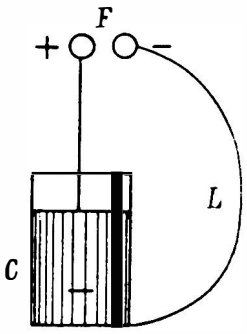


Abb. 83. Elektrischer Schwingungskreis einer Kleistschen Flasche.

Die an den Funkenkugeln liegenden Zuleitungen von der Spannungsquelle und diese selbst haben keinen wesentlichen Einfluß auf den Vorgang, da sie außerhalb der mit Einschluß des Funkens gut leitenden Entladungsbahn liegen. Daß die Schwingungen bald zum Stillstand kommen, dies liegt an der Aufzehrung der mit der Ladung der Flasche anfänglich gegebenen Energiemenge hauptsächlich in Stromwärme, im Leiter und im Funken[1]), wie beim elastischen Pendel in Reibungswärme.

Das tatsächliche Vorhandensein solcher Schwingungen war durch Beobachtung des Funkens F im Drehspiegel nachweisbar. Das Funkenbild wird bei sehr schneller Drehung des Spiegels in eine Reihe von Einzelbildern mit fast dunklen Zwischenräumen auseinandergezogen. Aus dem Abstand je zweier hellster Stellen voneinander ist bei bekannter Drehzahl des Spiegels die halbe Schwingungsdauer der Entladung zu entnehmen; denn diese hellsten Stellen sind den Zeiten stärksten Stromes im Entladungskreis zuzuordnen, die dunkelsten dem Ruhen der Elektrizität. Daß die aufeinanderfolgenden Einzelfunken einer hin- und hergehenden Elektrizitätsbewegung zugehören, dies war durch kleine Verschiedenheiten im Aussehen ihrer Enden an den Kugeln merklich. Das Stattfinden der Umladungen wird oft auch dadurch merklich, daß die Flasche nach Ablauf der Entladung tatsächlich mit einem Rest verkehrter Ladung sich vorfindet. Es kommt dies vor, wenn die Leitfähigkeit der Funkenbahn F bei abnehmender Energie der Schwingung nach einer ungeraden Zahl von Halbschwingungen versagt.

397. Die Schwingungsdauer, die Zeit eines Hin- und Herganges der elektrischen Schwingung, muß durch die Beschaffenheit des Leiters und seiner Enden gegeben sein; von der Menge der bewegten Elektrizität ist sie unabhängig zu erwarten, so wie die Pendelschwingungsdauer von der Amplitude unabhängig ist (M 170). Nach dem Gleichverhalten elektrischer und mechanischer

[1]) Es geht auch Energie in den Raum hinaus, in Form der elektrischen Wellen (410 u. f.), was lange nicht bedacht wurde.

Größen, welches wir bei Betrachtung der Selbstinduktion fanden (366), ist für die Schwingungsdauer T bei der Selbstinduktion L des Leiters und der Kapazität C seiner Enden zu erwarten

$$T = 2\pi\sqrt{LC}\,. \qquad 397)$$

Denn die mechanische Schwingung einer Masse m mit der Direktionskraft k hat die Dauer $2\pi\sqrt{m/k}$ (M Gl. 167a), und man kann hierin die mechanischen Größen durch die entsprechenden elektrischen ersetzen, nämlich m durch L und k durch 1/C. Denn es zeigte Selbstinduktion (L) die Bedeutung einer Masse (m), und die treibende Kraft der elektrischen Schwingung ist unzweifelhaft die bei der Ladung der Enden auftretende Spannung, welche bei der Ladung e gleich e/C, somit proportional e ist (Gl. 47), auf Einheitsladung bezogen — so wie die Direktionskraft k auf Einheitselongation bezogen ist — also 1/C. In den Dimensionen (291) der Größen stimmt die Gleichung 397; denn LC hat die Dimension eines Zeitquadrates (vgl. im absoluten elektromagnetischen System für C die Tab. 50; L hat im selben System nach Definition, Gl. 361, die Dimension einer Länge).

Die Schwingungsdauergleichung 397 ist durch die schon genannten Drehspiegelbeobachtungen an Flaschenentladungen bestätigt. Es kommt aber auch darauf an, daß sie mit allgemeinster zugehöriger Erfahrung, nämlich mit dem Induktionsgesetz und mit Ohms Gesetz in quantitativer Übereinstimmung ist, und der Nachweis hiervon (William Thomson 1853) war überhaupt der Anfang zur Beachtung und Erforschung der elektrischen Schwingungen gewesen. Die kleine zugehörige Rechnung enthält nichts Neues, sondern nur die quantitative Probe auf die im Vorstehenden schon entwickelten Gedanken[1]); sie zeigt die Gleichbedeutung der in Vergleich gestellten elektrischen und mechanischen Größen bestätigt.

Die Schwingungsdauer ist nach der Gl. 397 vom Stoffe abhängig, in welchem die Kraftlinien der Schwingung verlaufen, und zwar ist sie proportional $\sqrt{\varepsilon\mu}$, weil die Kapazität C proportional der Dielektrizitätskonstante ε und die Selbstinduktion L proportional der Permeabilität μ ist (106, 361). Ist $\mu = 1$, wie sehr nahe für die meisten Stoffe (Tab. 49), so ist T proportional $\sqrt{\varepsilon}$. Dies kann auch zur Messung von Dielektrizitätskonstanten benützt werden.

Ist der Widerstand in der Entladungsbahn sehr groß, so kann keine Schwingung zustande kommen; die Entladung verläuft dann als einfacher Strom von allmählich abnehmender Stärke, ganz ähnlich dem Verhalten eines Pendels bei sehr großer Reibung[2]).

Die Schwingungsdauern, welche man mit Kleistschen Flaschen gewöhnlichen Ausmaßes und einfachen Drähten im Schwingungsbogen erhält, gehen nach Hunderttausendteln von Sekunden. Mit Einschaltung von Spulen großer Selbstinduktion, z. B. der Sekundärwickelung eines Induktoriums, werden die Schwingungen entsprechend langsamer; man kann sie dann auch durch plötzliches Öffnen des Primärstromes des Induktoriums erregen, so daß sie ganz ohne Funkenstrecke ablaufen. Verwendet man außerdem noch außerordentlich große Kapazi-

[1]) Man findet die Rechnung im Anhang E IV.
[2]) Vgl. Anhang M I b, Bd. I.

täten an den Enden der Induktoriumswickelungen, so kann man die Schwingungsdauer auf die Größenordnung einer Sekunde bringen.

398. Wechselstromeigenschaften der Schwingungen. — Von besonderem Interesse sind die schnellen Schwingungen zunächst als Wechselströme, die man mit so hohen Wechselzahlen wie 10000 oder 100000 in der Sekunde mit den Wechselstrommaschinen nicht hervorbringen kann. Sie zeigen alles, was bei hohen Wechselzahlen besonders ausgeprägt zu erwarten ist (380 u. f.), wobei auch, darüber hinausgehend, noch Neues sich zeigt (399—405).

Zur Beobachtung kann man vorteilhaft zwei Kleistsche Flaschen in den Schwingungskreis schalten, der dadurch ganz symmetrisch wird, wie es Abb. 84 schematisch und Abb. 85 in Ausführung zeigt. F ist wieder die mit der Spannungsquelle verbundene Funkenstrecke, von welcher aus die beiden Kapazitäten C_1 und C_2 geladen werden, wobei gleichzeitig deren andere Belegungen durch Influenz mit Ladung des anderen Zeichens versehen werden, indem die beiden abgestoßenen Elektrizitäten über L sich neutralisieren. In diesem, durch die Zeichen + — in Abb. 84 angedeuteten Zustand setzt bei genügend hoch gewordener Spannung der Funke bei F ein, womit der Schwingungsvorgang eröffnet ist. Es richten sich hier die beiden durch die Isolierschichten der Kondensatoren getrennten Teile der schwingenden Strömung zu einheitlicher Schwingungsdauer ein; der elektromagnetische Vorgang ist überhaupt, wie bald näher zu zeigen, durch die Isolierschicht gar nicht wesentlich unterbrochen (407). Als Spannungsquelle dient am besten das Induktorium; es erneuert sich dann der Schwingungsvorgang so oftmal in der Sekunde, als der Unterbrecher den Primärstrom des Induktoriums öffnet; jeder einzelne Schwingungsvorgang besteht wegen der Dämpfung, besonders durch die Funkenstrecke, nur aus wenigen Hin- und Hergängen mit schnell abnehmender Amplitude.

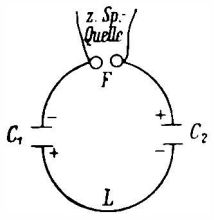


Abb. 84. Schwingungskreis mit 2 Kapazitäten.

399. Der große Einfluß der Selbstinduktion gegenüber dem Widerstand bei der Fortleitung so schneller Schwingungen kann mit Hilfe der in Abb. 85 sichtbaren, in den Schwingungsweg geschaltenen Verzweigungsvorrichtung gezeigt werden (vgl. 392). Der leitende Weg zwischen

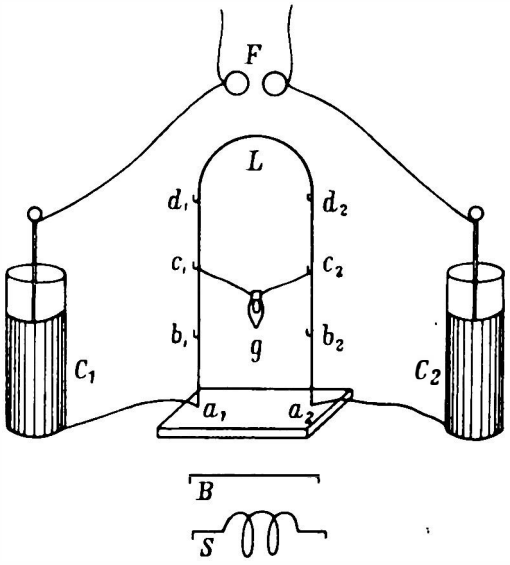


Abb. 85. Selbstinduktionswirkungen einer elektrischen Schwingung.

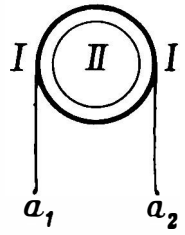


Abb. 85a. Induktionswirkungen einer elektrischen Schwingung.

a_1 und a_2 ist bei c_1 und c_2 verzweigt einerseits über die kleine Glühlampe g, anderseits über den Drahtbogen L. Die Glühlampe leuchtet sehr hell, trotz ihres leicht 100-fachen Widerstandes im Vergleich zu L, weil L als der längere Weg mehr Selbstinduktion hat. Auch wenn man den dicken Kupferdraht B über die Häkchen d_1 d_2 legt, leuchtet g noch hell; nur auf c_1 c_2 oder b_1 b_2 gelegt, verdunkelt der Draht die Lampe, was verständlich ist, weil so der Weg über die Lampe, deren Faden dünn ist, die größere Selbstinduktion bietet. Hat aber der aufgelegte dicke Kupferleiter einige Windungen, wie S in der Abbildung, so stört er das Leuchten der Lampe in keiner der Lagen, auch auf c_1 c_2 nicht, weil er wegen zu großer Selbstinduktion fast gar nichts von der Schwingung aufnimmt.

400. Um die sehr starken Induktionswirkungen auf andere Leiter zu zeigen, die bei so hohen Wechselzahlen wegen der entsprechend schnellen Bewegung der Magnetkraftlinien zu erwarten sind, kann an Stelle des Leiters L in Abb. 85 der Leiter Abb. 85a in die Schwingung bei a_1a_2 eingeschaltet werden, bestehend aus einem Bündel einiger Drahtwindungen, dargestellt durch den dicken Kreis I I. Die Windungen müssen sehr gut voneinander isoliert sein, da sonst die Schwingung in Funken auf kurzem Wege die Windungen überspringen würde. Es entspricht dies der hohen Spannung, welche schon jede einzelne Windung bei der hohen Wechselzahl dem Durchgang entgegenstellt (vgl. 389). In dieses primäre Windungsbündel I I können verschiedene, in der Abbildung durch den dünnen Kreis II angedeutete Sekundärleiter gebracht werden.

Benutzt man als Sekundärleiter eine Spule gut isolierten Drahts mit etwa der 10fachen Windungszahl des Bündels I, so erhält man an den Enden dieser Sekundärspule eine entsprechend hohe Spannung hoher Wechselzahl. Bei Erdverbindung des einen Endes der Spule ist diese Spannung am anderen Ende gegen Erde vorhanden; trägt dieses Ende einen frei in die Luft ragenden Draht, so finden Funkenentladungen aus demselben in die Luft statt. Bei gleich hoher nicht wechselnder Spannung würden so lebhafte Entladungen nicht stattfinden, weil die den Draht umgebende Luft bald durch Spitzenentladungen gleichnamig aufgeladen wäre.

401. Geringes Folgen der Ionen. — Bemerkenswert ist auch noch ein anderer Unterschied dieser Wechselstromentladungen gegenüber den Funken aus dauernd gleichgeladenen Leitern: Man kann die Funken hoher Wechselzahlen in die Hand springen lassen ohne Muskelzuckungen zu verspüren; nur Wärmeempfindung ist bei genügender Intensität des durch den Körper zur Erde angeleiteten Stromes vorhanden. Die Ursache des Ausbleibens der Muskel- oder Nervenerregung bei Wechselzahlen von 100000 oder mehr in der Sekunde trotz der hohen Spannung, die bei Gleichstrom oder langsamen Wechseln sehr gefährlich wäre, liegt darin, daß die Stromleitung in den Körpergeweben elektrolytisch ist, d. h. in Wanderung von Ionen besteht (186), und daß diese Wanderungen bei so hohen Wechselzahlen auf äußerst kurze Wege beschränkt sind, weil die Masse selbst des Wasserstoffions zu groß ist, um so schnell die Richtung wechselnden Kräften weit folgen zu können. Wenn aber die Ionen nicht wesentlich von der Stelle kommen, werden keine Stoffe im Zellgewebe übertragen, und damit fehlen die Wirkungen auf Nerven und Muskeln (187).

Man hat wegen des Nichtmitfolgens der Ionen in feuchten Leitern auch gar keine Isolationsschwierigkeiten bei hohen Wechselzahlen, wenn die Spannung nicht so hoch ist, daß Durchschlagsfestigkeit in Betracht kommt; Holz z. B. ist für schnelle Schwingungen bei niedriger Spannung ein genügend guter Isolator.

402. Induktion in einfachem Kreise. — Benutzt man als sekundären Leiter II (Abb. 85a) einen einfachen, zum Kreis gebogen, aber nicht ganz geschlossenen Draht mit einer Lücke von etwa ½ oder 1 mm, so springen an dieser Lücke Funken über, was Spannungen von Tausenden von Volt anzeigt. Man sieht daraus nach dem Induktionsgesetz (341), daß die Schnitte der Magnetkraftlinien mit dem Draht hier in sehr kurzer Zeit erfolgen müssen, was der sehr schnellen Bewegung der Kraftlinien bei solchen Schwingungen (vgl. 380, 404) auch entspricht; man erreicht hier mit nur einer einzigen Sekundärwindung

und den wenigen Primärwindungen von I[1]) Spannungen, die in einem Induktorium mit unterbrochenem Gleichstrom Tausende von Sekundärwindungen erfordern.

Eine sehr bemerkenswerte, aufschlußreiche Beobachtung ergibt sich, wenn man eine Glaskugel, die sehr verdünnte Luft enthält, in das Windungsbündel I (Abb. 85a) bringt, so daß die Kugel von der Ebene der Windungen halbiert wird. Der Kreis II in Abb. 85a deutet die Kugel an. Es erscheint dann ein hell leuchtender Ring in der Kugel; er liegt in der Ebene der Windungen, ziemlich dicht an der Innenwand der Kugel, ist also den induzierenden Windungen parallel, ganz wie der vorher als Sekundärleiter benutzte Drahtkreis. Offenbar hat hier die im Kreise herum wirkende Induktion sich selbst einen leitenden Kreisweg in der Luft geschaffen, der durch Leuchten sichtbar wird.

Bringt man einen zum Ring zusammengebogenen Streifen dünnsten Stanniols zwischen die Gaskugel und das induzierende Windungsbündel I, so erscheint der leuchtende Ring nicht. Wir haben hier den schon bei den langsamen Wechselströmen studierten elektrodynamischen Schutz, der hier ebenso wie dort sich erklärt (384). Auch hier gilt es, daß die Ströme sowohl in der Schwingungsbahn selbst als auch in induzierten Leitern nur die Oberfläche benutzen (Hauteffekt, 385) und zwar hier wegen der sehr großen Wechselzahlen sogar nur eine sehr dünne Oberflächenschicht.

403. Es ist zu dieser Benutzung verdünnter Gase zum Nachweis elektrischer Kräfte zu bemerken, daß verdünnte Gase ebensowenig Leiter der Elektrizität sind als die gewöhnliche Luft, daß sie aber — ebenso wie diese — durch vorhandene Spannung leitend werden und dann unter Leuchten den Ausgleich der Spannung bewirken. Die zur Herstellung von Leitfähigkeit nötige Spannung ist aber bei geeignet verdünnten Gasen sehr viel niedriger als bei gewöhnlichem Druck. Daher sind verdünnte Gase besonders geeignet, geringe, irgendwie im Raum verteilte Spannungen durch Aufleuchten sichtbar zu machen. Allerdings gelingt dies nicht bei dauernd gleichbleibenden Spannungen, weil dieselben durch das leitend gewordene Gas alsbald vernichtet werden, wohl aber bei stets in wechselnder Richtung neu auftretender Spannung, wie sie in der Umgebung einer elektrischen Schwingung vorhanden ist. Röhren mit genügend verdünnten Gasen leuchten daher dauernd[2]) in der Nähe einer elektrischen Schwingungsbahn. Das Leuchten kann zweierlei Ursachen haben; es kann unmittelbar durch die elektrischen Kräfte der Schwingung hervorgebracht sein, oder aber auch durch deren magnetische Kräfte. Letzteres erfolgt, wenn die schnell bewegten Magnetkraftlinien die Gasstrecke des Rohres durchschneiden, und von dieser Art ist das soeben beschriebene ringförmige Aufleuchten in der Kugel.

404. In sich geschlossene elektrische Kraftlinien. — Das Magnetfeld des induzierenden Windungsbündels (I, Abb. 85a) ist gleich dem eines Kreisstromes (285, Abb. 32), nur daß hier, beim Wechselstrom, die Kraftlinien in Bewegung sind, nämlich abwechselnd in den Kreisleiter hineinsinkend, mit entgegengesetzter Richtung wieder herauskommend, nach voller Entwickelung wieder zurücksinkend und so fort. Die Richtung dieser Querbewegungen der Magnetkraftlinien ist dabei stets radial; senkrecht zu dieser Bewegungsrichtung und zur Richtung der Kraftlinien ist nach dem elektrodynamischen Zusammen-

[1]) Daß wenige Primärwindungen genügen, dies hängt mit den nicht geringen Strom stärken solcher Schwingungen zusammen. Zwar sind die in den Kleistschen Flaschen gegebenen Elektrizitätsmengen nicht groß; aber sie kreisen in der kurzen Zeit der Schwingungsdauer hin und her. Man kann dies nach einem früher gegebenen Zahlenbeispiel (121) überlegen. 0·001 Coulomb in $^1/_{100\,000}$ sek wären 100 Weber.

[2]) Das scheinbar dauernde Leuchten ist intermittierend, wie man bei Hin- und Herbewegen des Rohres leicht sieht; das Aufleuchten erfolgt so oft, als die Schwingung durch den Unterbrecher des Induktoriums neu erregt wird. Intermittenzen, die zur Schwingung selbst gehörten, kann man so nicht sehen, weil sie viel zu schnell erfolgen.

hang (329, Abb. 63) die von ihnen induzierte elektrische Kraft gerichtet. Die so gegebenen Kraftrichtungen schließen sich in der ganzen Ebene des Schwingungskreises zu konzentrischen Kreisen zusammen. Wir haben also hier kreisförmige, in sich geschlossene elektrische Kraftlinien, und diese Kraftlinien sind es, die das Gas in der Kugel ringförmig erleuchten; der Ring ist ein erleuchtetes Kraftlinienbündel.

Wir werden hier zum erstenmal auf das Vorkommen in sich zurücklaufender elektrischer Kraftlinien aufmerksam. Magnetische Kraftlinien sind immer in sich zurücklaufend (255); sie enden nie. Elektrische Kraftlinien enden dagegen immer, wenn sie in Ruhe sind (72); nur in Bewegung können sie auch in sich zurücklaufend auftreten. Dies war hier beim Schwingungskreis der Fall; ganz ebenso ist es aber bei jedem Kreisstrom von veränderlicher Intensität, und wir hätten nach Kenntnis des elektrodynamischen Zusammenhangs schon beim Induktorium (336, 347) darauf aufmerksam machen können, daß es um die Achse der Primärspule kreisförmig herumgehende elektrische Kraftlinien sind, die in den Sekundärwindungen, welche eben in diesen Kreisen laufen, den induzierten Strom hervorbringen.

405. Induktion im Äther. — Es fehlte jedoch zu solcher Auffassung der Induktion der Nachweis, daß die elektrischen Kraftlinien als Folge der Bewegung der magnetischen Kraftlinien auch dann vorhanden sind, wenn kein Leiter im Raume da ist. Dieser Nachweis kann durch das Auftreten des leuchtenden Ringes in der Gaskugel (402) als erbracht angesehen werden. Denn das Gas ist vor Auftreten der elektrischen Kraft in der Tat kein Leiter; die Leitfähigkeit des Gases ist vielmehr Folge des Vorhandenseins von elektrischer Kraft, so wie es auch der Funke in gewöhnlicher Luft ist. Unterhalb einer gewissen Kraftgröße tritt die Leitfähigkeit gar nicht ein (vgl. 513 u. f.); es muß erst genügende Kraft da sein, dann wird das Gas leitfähig und dann leitet es mit gleichzeitigem Leuchten.

Man sieht daher, daß elektrische Kraftlinien unter allen Umständen auftreten, wenn magnetische Kraftlinien in Bewegung sind, gleichgültig ob Materie im Raum ist oder ob nicht. Bisher war ausschließlich der an sich wichtige Fall der Bewegung magnetischer Kraftlinien quer durch Leiter behandelt worden, und für diesen Fall der Kraftlinienschnitte mit einem Leiter hatten wir das Induktionsgesetz für die auftretende Spannung hingestellt (341), nicht ohne aber von vornherein auf die jetzt ersichtlich gewordene Gültigkeit für alle Fälle von Kraftlinienbewegung hinzuweisen (340). Wir sehen jetzt, daß Schnitte magnetischer Kraftlinien immer Spannung — elektrische Kraft — induzieren, auch wenn es nur Schnitte mit dem Äther des Ortes sind[1]).

Ebenso fanden wir für die Querbewegungen der elektrischen Kraftlinien, die ebenfalls relativ zum Äther des Ortes zu nehmen waren (298), daß sie immer magnetische Kraft hervorbringen (s. 343).

Beides haben wir schon zusammengefaßt im elektrodynamischen Zu-

[1]) Es ist hier anzumerken, daß der Nachweis nie fehlender Induktionswirkung schon vor Kenntnis der hier — als anschauliches Beispiel — vorangestellten Ringentladung geliefert war durch die Auffindung der elektrischen Wellen (417), die auch im materiefreien Raum sich entwickeln.

sammenhang (328 u. f., Abb. 63), der damit alles über den Zusammenhang elektrischer und magnetischer Kräfte grundlegend Bekannte enthält.

Die Erkenntnis, daß Kraftlinienbewegungen relativ zum Äther des Ortes in Betracht kommen — besonders auch für die Induktion —, läßt schließen, daß bei der Induktion auch der Eigenäther kleiner Körper in Wirkung tritt. Die Tatsache der Induktion bei Bewegung eines Leiters in einem an Erde ruhenden Magnetfeld zeigt dies. Schnitte der Kraftlinien mit dem Erdäther finden hier nicht statt, da derselbe vom Leiter nicht mitgenommen wird (O 136); maßgebend für die Induktion sind die Schnitte der Kraftlinien mit dem bewegten Leiter, und wenn — wie das Vorhergehende zeigt — Schnitte mit Äther das Wirksame sind, so ist es der Äther des Leiters, dessen Mitbewegung hier wirkt[1]).

Die Induktion in bewegten Leitern, wie hier zusammen betrachtet mit dem leuchtenden Ring in der luftverdünnten Kugel, ist wohl der beste bisher vorhandene Nachweis dafür, daß jedes Stück Materie seinen eigenen, mit ihm bewegten Äther hat[2]).

Den Lichtwellen gegenüber machte sich der Äther kleiner Körper nicht merklich (O 136). Es kommt hierbei aber auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektrischer und magnetischer Kräfte an, die schon gleiche Größe haben (vgl. 343) und für deren Ausbreitung der Erdäther im Körper überwiegend vorhanden ist, nicht auf das Hinzukommen der einen Kraftart zur anderen infolge der Schnitte, die allein nur den Äther des Körpers betreffen.

406. Maxwells Gleichungen. — Eine mathematische Zusammenfassung der Beziehungen elektrischer und magnetischer Kraftlinien zueinander hat Maxwell in seinen Gleichungen gegeben[3]), die für Behandlung verwickeltster Fälle, besonders bei elektrischen Wellen höchst wertvoll sind, was wir schon in der Optik wiederholt benutzt haben (O 88, 176), die aber doch weniger umfassen als unser elektrodynamischer Zusammenhang, wie es die folgende Inhaltsangabe der Gleichungen zeigt.

Der eine Teil (I) dieser Gleichungen bezieht sich auf die Induktion, d. i. auf die elektrischen Wirkungen magnetischer Kräfte, der andere Teil (II) auf die magnetischen Wirkungen elektrischer Kräfte. Außerdem fassen die Gleichungen (III) auch einen Teil der von uns in Worten beschriebenen Eigenschaften der elektrischen und der magnetischen Kraftlinien zusammen.

Der die Induktion betreffende Teil (I) bringt die im Vorhergehenden betrachtete, im Kreise herum gerichtete elektrische Kraft zur Darstellung, welche an jedem Ort veränderlicher magnetischer Kraft zu finden

[1]) Wenn der Äther kleiner Körper auch gegenüber elektrischen Kraftlinien sich wirksam zeigt, was nicht zu bezweifeln ist, so muß — dem elektrodynamischen Zusammenhang entsprechend — in einem quer durch ein elektrisches Feld bewegten Körper magnetische Kraft auftreten.

[2]) Die schon in der Optik betrachteten Nachweise, den Äther der Erde betreffend (O 23, 138), sind vielleicht insofern nicht so überzeugend, als sie nur Beobachtungen mit negativem Ergebnis und etwas verwickelte Vorgänge betreffen. Es bleibt nämlich dabei die Besorgnis, daß vielleicht noch unbekannte Dinge mitwirken. Denn man kann aus dem Ausbleiben einer Wirkung nicht sicher auf das Fehlen einer bestimmten Ursache schließen, sobald auch andere Ursachen beteiligt sein können.

[3]) Man findet die Gleichungen mit eingehenden Erläuterungen im Anhang E V a. Die Gleichungsgruppen sind dort mit Zahlen (I, II, III) bezeichnet, die auch oben (eingeklammert) benutzt werden.

ist. Die ganze Kenntnis von der Induktion ist damit nicht umfaßt; die Gleichungen beziehen sich nur auf diejenigen Fälle von Bewegungen magnetischer Kraftlinien, welche durch zeitlich veränderliche magnetische Kraft verursacht sind, nicht aber auf Induktion in unveränderlichen Feldern. Beispielsweise ist der nach dem elektrodynamischen Zusammenhang selbstverständliche Induktionsfall der Bewegung eines Leiters quer durch ein homogenes Magnetfeld nicht mit umfaßt[1]). Man kann deshalb Maxwells Gleichungen als die Grundgleichungen der Elektrodynamik für ruhende Körper[2]) bezeichnen.

Der andere Teil (II) der Gleichungen, welcher die Kenntnis vom Zusammenhang der elektrischen und magnetischen Kräfte bei ruhenden Körpern durch Hinzunahme der magnetischen Wirkungen elektrischer Kräfte vervollständigt, sagt aus, daß rings um die Richtung zeitlich in Änderung befindlicher elektrischer Kraft stets im Kreise herum gerichtete magnetische Kraft vorhanden ist, sowie daß ein elektrischer Strom ganz ebenso wirkt wie ihm gleichgerichtete, zeitlich ansteigende elektrische Kraft. Was den elektrischen Strom anlangt, so bedeuten die Gleichungen seine ihn stets umschließenden magnetischen Kraftlinien (278), dasselbe, was wir schon als Folge des allgemein geltenden elektrodynamischen Zusammenhangs erläutert haben (328 u. f.). Daß auch veränderliche elektrische Felder dieselben magnetischen Kraftlinien haben, wie Ströme, dies kann ebenfalls als Folge des elektrodynamischen Zusammenhangs leicht an einem in Ladung oder Entladung befindlichen Plattenkondensator eingesehen werden, wie das Folgende zeigt.

407. Magnetfeld veränderlicher elektrischer Kräfte gleich dem elektrischer Ströme. — Wir betrachten einen der Kondensatoren des Schwingungskreises Abb. 84 (398). Wenn während der Schwingungen die Ladung des Kondensators in Zunahme sich befindet, so wandern elektrische Kraftlinien, mit ihren Enden an den Zuleitungen gleitend, in sein Feld hinein, stets nahe senkrecht zur Leiteroberfläche bleibend (125). Diese Bewegung der elektrischen Kraftlinien ergibt aber, nach dem elektrodynamischen Zusammenhang[3]), nicht nur um die Zuleitungen herum, in denen der Strom fließt, sondern auch um den Zwischenraum der Kondensatorplatten herum die gleichen im Kreise geschlossenen Magnetkraftlinien.

Die in dieser Weise, bei Kenntnis der Allgemeingültigkeit des elektrodynamischen Zusammenhangs, selbstverständliche Gleichheit der magnetischen Wirkungen veränderlicher elektrischer Felder und elektrischer Ströme ist auch durch besondere Versuche an elektrischen Schwingungen geprüft und bestätigt worden. Vollends außer Zweifel gesetzt ist die Gleichheit durch die richtigen Folgerungen, welche sie in bezug auf das Bestehen und die Eigenschaften elektrischer Wellen mittels Maxwells Gleichungen lieferte[4]), und dies ist umgekehrt auch einer der Nachweise für die Allgemeingültigkeit des elektrodynamischen Zusammenhangs.

[1]) S. dazu Anh. E V a, 11.

[2]) Was man von der Elektrodynamik bewegter Körper weiß, ist in der Gesamtheit der Kraftlinieneigenschaften enthalten, wozu auch der elektrodynamische Zusammenhang und die Kenntnis vom Äther gehört.

[3]) Man hat bei solchen Überlegungen immer am besten ein Modell des Zusammenhangs zur Hand (329, Abb. 63).

[4]) S. Anhang E V b.

Bei dieser Gleichheit der magnetischen Wirkung von Strömen und von in Änderung begriffenen elektrischen Feldern ist das gesamte Magnetfeld des Schwingungskreises Abb. 84 gleich dem eines geschlossen hin und her fließenden Stromes; die Unterbrechungen durch die Kondensatoren $C_1 C_2$ ändern nichts Wesentliches an dem Feld.

408. Gradlinige Schwingungsbahn. — Will man schnellere Schwingungen als die Kleistscher Flaschen mit kurzem Entladungsbogen (Abb. 83), so kommt nach der für die Schwingungsdauer geltenden Gleichung 397 bei der schon geringen Selbstinduktion des kurzen Drahtes nur Verringerung der Kapazität in Betracht, erreichbar durch Fortlassung des Dielektrikums der Flasche und Abstandsvergrößerung der Belegungen. Man gelangt so zu dem für alles weitere sehr wichtig gewordenen geradlinigen „Oszillator" (Hertz 1887), Abb. 86. Die Belegungen haben hier die Gestalt von Metalltafeln an den beiden Enden des Leiters, der in seiner Mitte die Funkenstrecke F trägt. An Stelle der Metalltafeln können auch Kugeln genommen werden, was bessere Berechnung der Kapazität erlaubt. Die Schwingungsdauer $T = 2\pi\sqrt{LC}$ wird bei etwa 1 m Länge des Leiters aus dickem Drahte mit Endkugeln von etwa 30 cm Durchmesser zu rund 10^{-8} sek berechnet. Zur Erregung der Schwingungen kann wieder das Induktorium mit Anschaltung an die Funkenstrecke dienen.

Die Schwingungszustände sind dieselben, wie bereits für die Kleistsche Flaschenentladung erläutert (396); sie sind in Abb. 86 für die vier Viertel einer

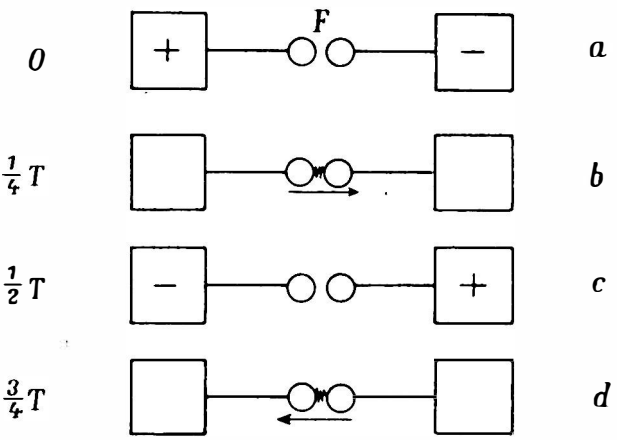


Abb. 86. Gradliniger Oszillator.

Schwingungsdauer dargestellt. Zur Zeit 0 sind die Endplatten aufgeladen, doch ruht die Elektrizität auf ihnen; sogleich danach tritt bei F der Funke auf. Zur Zeit $\frac{1}{4}$T ist der Funke voll entwickelt; die Ladung der Platten ist in Strömung begriffen. Zur Zeit $\frac{1}{2}$T hat die weitergegangene Strömung zur Umladung der Platten geführt; der Funke ist einen Augenblick erloschen. Zur Zeit $\frac{3}{4}$T ist wieder stärkste, aber entgegengerichtete Strömung mit zugehörigem Funken da; die Platten haben wieder keine Ladung. Zur Zeit T endlich ist der Zustand der Zeit 0 wiedergekehrt.

409. Nachweis der Schwingungen durch Resonanz. — Die Kontrolle des Vorhandenseins und der berechneten Dauer der Schwingungen ist hier schwieriger als bei den größeren Schwingungsdauern; doch hat sie mit äußerst schnell gedrehtem Spiegel ausgeführt werden können (396).

Zum bloßen Nachweis des Vorhandenseins einer Schwingung mit festbestimmter Dauer ist aber — wie stets bei Schwingungen, die in die Ferne wirken, gleich den Schallschwingungen (A 82 u. f.) — Resonanz das beste Mittel. Man stellt neben dem Oszillator O O, Abb. 87, ein Drahtviereck R R auf, das eine kleine Funkenstrecke f enthält und das als Resonator dienen kann. Das Viereck hat nämlich selbst eine Eigenschwingungsdauer, da es hin und her gehende Ströme führen kann, die die Kugeln der Funkenstrecke f mit wechselnden Zeichen aufladen. Das Auftreten eines Funkens an diesen Kugeln bei f liefert den Nachweis solchen „Ansprechens" des Resonators auf die Schwingungen des Oszillators. Dies tritt aber nur ein, wenn Gleichheit der Schwingungsdauern bei Oszillator und Resonator vorhanden ist[1]). Die Schwingungsdauer des Resonators ist durch die Selbstinduktion des Drahtvierecks und die Kapazität von dessen Enden mit den Funkenkugeln gegeben. Das Produkt der beiden muß ebenso groß sein wie das entsprechende Produkt für den Oszillator. Man erreicht dies am besten durch probeweises Verändern der Drahtlängen des Resonators, solange bis die Funken bei f zu bester Entwickelung kommen. Ist die Funkenstrecke nicht zu klein, so verschwinden die Funken schon bei geringer Abänderung der einmal richtig eingestellten Schwingungsdauer des Resonators. Hängt man z. B. Stanniolstreifen an seine Drahtenden bei f, was die Kapazität und also die Schwingungsdauer vergrößert, so verschwinden die Funken; sie kehren aber wieder, wenn auch der Oszillator entsprechend geändert, z. B. durch Vergrößerung seiner Endplatten ebenfalls auf größere Schwingungsdauer gebracht wird. Solche Versuche geben die Überzeugung, daß die Erregung des Resonators tatsächlich auf Resonanz mit dem Oszillator beruht; denn nur bei Resonanz kommt es auf Gleichheit der Schwingungsdauern an. Zugleich ist auch nachgewiesen, daß überhaupt Schwingungen vorhanden sind, nicht etwa nur plötzliche Aufladung und Entladung des Oszillators.

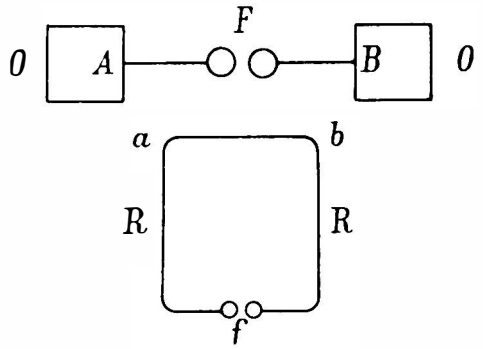


Abb. 87. Oszillator mit Resonator.

Die Erregung des Resonators von seiten des Oszillators ist hier als einfache Induktionswirkung aufzufassen. Die geradlinige, über die Funkenstrecke F gehende Strombahn A B des Oszillators ist der Primärleiter, die Drahtstrecke a b des Resonators der Sekundärleiter. Ein einzelner Induktionsstoß durch eine einzelne plötzliche Stromänderung in A B würde aber keine von den Abmessungen

[1]) Der Resonator kann auch Kreisform haben, wie in Abb. 90 (417), was zu späteren Zwecken vorteilhaft ist.

des Resonators abhängigen und überhaupt höchstens schwache Funken an ihm hervorbringen; es ist die Häufung von periodisch wiederholten, stets rechtzeitig eintreffenden Stößen, die das besondere, starke Ansprechen eines abgestimmten Resonators ergibt, wie es bei jeder Resonanz wesentlich der Fall ist (A 83).

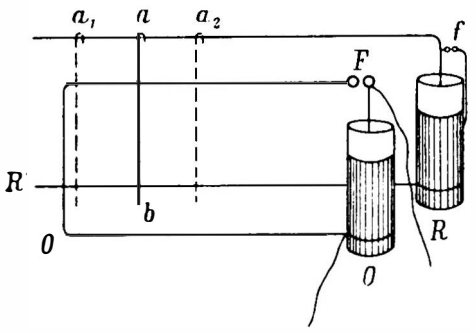


Abb. 88. Zwei Flaschenkreise in Resonanz.

Es sei bemerkt, daß Resonanz auch bei langsameren Schwingungen feststellbar ist. Befinden sich zwei Schwingungskreise O O und R R mit gleichen Kleistschen Flaschen und mit Drahtwegen gleicher Selbstinduktion nebeneinander, wie es Abb. 88 zeigt, so treten beim Ingangsetzen von O auch in R Funken auf zum Zeichen, daß R mitschwingt. Die kleine Funkenstrecke f, die dies sichtbar macht, verbindet die beiden Belegungen der Flasche des Resonators auf kurzem Wege. Ändert man die Schwingungsdauer des Resonators durch Verschieben seines beweglichen Drahtteiles a b nach a_1 oder a_2, so verschwinden die Funken bei f, was wieder den Resonanzcharakter der Erscheinung nachweist.

Elektrische Wellen.

410. Vorgegebene Kenntnisse. — Wir haben die Wirkung eines Oszillators auf den Resonator, wie beispielsweise in Abb. 87, als einfache Induktionswirkung aufgefaßt (409), und dies ist auch richtig; denn die Magnetkraftlinien des veränderlichen Stromes A B schneiden den Leiterteil a b des Resonators (335), oder genauer: die von der Fläche des Resonatorkreises umschlossene Magnetkraftlinienzahl (344) des Oszillators ist während dessen Schwingung in fortdauernder Veränderung.

Man kann aber das Mitschwingen eines gut abgestimmten Resonators auch in großen Entfernungen, wie z. B. 10 und mehr Meter querab von der Strombahn A B des Oszillators gut beobachten, und es ist dann die Frage, wie die Ausbreitung der Kraftlinien vom Oszillator aus vorzustellen sei. Richtig ist es nach aller bereits vorgebrachten Kenntnis jedenfalls, daß zu den Zeiten des Anwachsens des Stromes im Oszillator (0 bis $\frac{1}{4}$T in Abb. 86) Magnetkraftlinien als vertikalstehende Kreise aus seinem Leiter hervortreten (368), sowie auch daß zu den Zeiten des Ansteigens der Ladung der Endplatten ($\frac{1}{4}$T bis $\frac{1}{2}$T in Abb. 86) elektrische Kraftlinien von Ende zu Ende aus ihm sich entwickeln müssen, für die bei voller Ladung das Kraftlinienbild der Abb. 79 in Bd. III gültig sein könnte. Aber es kommt darauf an, wie schnell diese aus dem Oszillator mit abwechselnd entgegengesetzter Richtung neu hervortretenden Kraftlinien beider Arten in den Raum hinaus sich ausbreiten und wie weit also Kraftlinien der einen Richtung zu einer Zeit gekommen sein werden, zu welcher dicht beim Oszillator bereits entgegengesetzte Kraftlinien in der Entstehung begriffen sind. Laufen hinausgegangene Kraftlinien mit bestimmter, endlicher Geschwindigkeit weiter, so müssen sich Wellen elektrischer und magnetischer Kraft um den Oszillator ausbilden. Denn jeder sich ändernde Raumzustand irgendwelcher Art, der von einer Stelle, wo er hervorgebracht wird, mit endlicher Geschwindigkeit sich ausbreitet, ergibt notwendigerweise eine Welle oder — wenn er periodisch sich ändert — einen Wellenzug, ausgehend von der Ursprungsstelle und dann

unabhängig von ihr weiterlaufend. Es ist dabei gleichgültig, ob der ausbreitungsfähige Raumzustand etwa eine losgelassene Verdichtung der Luft des Raumes oder eine freigegebene Störung einer Wasseroberfläche oder der Stoß an einem Seile ist, was alles die Wellen in Materie schon lehrten (A 3 u. f.). Es genügt zu wissen, daß elektrische und magnetische Kraftlinien durch ihr Querdrängen die Fähigkeit von Ausbreitung haben (87, 125, 248), um versichert sein zu können, daß elektromagnetische Wellen um einen elektrischen Oszillator gesucht werden dürfen.

Was die zu erwartende Ausbreitungsgeschwindigkeit betrifft, so hatten bereits frühe Versuche gezeigt (126), daß elektrische Spannung mit einer der Lichtgeschwindigkeit nahen Geschwindigkeit an Drähten sich ausbreitet, und die durch Faraday schon gegebene Erkenntnis, daß diese Ausbreitung das Ergebnis des seitlichen Drängens der elektrischen Kraftlinien ist, mußte eine solche Geschwindigkeit auch für die elektrischen Wellen erwarten lassen.

Dazu kommt noch, daß die zu erwartenden Wellen transversal sein müßten; denn die elektrischen und die magnetischen Kraftlinien einer elektrischen Schwingung, sowie auch ihre eigene und die von ihr induzierte Strömung stehen senkrecht zu den Richtungen, nach welchen hin ihre induzierenden Wirkungen sich übertragen. Querwellen, die ohne Materie sich ausbreiten, und zwar auch mit Lichtgeschwindigkeit, waren aber im Lichte schon bekannt (O 1 u. f.); Wellen von der Art der Lichtwellen waren also um die elektrischen Oszillatoren zu erwarten, wenn auch nicht sichtbar, weil in der Wellenlänge weit außerhalb der Grenzen des sichtbaren Spektrums liegend. Zur Berechnung der Wellenlänge λ bei bekannter Schwingungsdauer T des Oszillators unter Annahme der Lichtgeschwindigkeit c für die Ausbreitung war seit Newton die für alle Wellen geltende Gleichung $c = \lambda/T$ gegeben (A, Gl. 5). Diese Gedanken zusammenfassend hatte schon Maxwell (1864) durch seine Gleichungen, deren Inhalt wir bereits bezeichneten (406), mit elektromagnetischen Wellen rechnen gelehrt[1]).

411. Um nachweisbare Wellen zu verwirklichen, mußte vor allem für genügend schnelle Schwingungen gesorgt werden, was, wie bereits bemerkt, durch H. Hertz geschehen ist (408). Denn sei die Schwingungsdauer $T = 1$ sek, so ist die Wellenlänge $\lambda = 300000$ km zu erwarten; sei $T = {}^1/_{100\,000}$ sek, wie bei den Entladungen Kleistscher Flaschen (396), so ist $\lambda = 3$ km, und solche Wellenlängen sind zu groß, um untersucht zu werden, ja man könnte, wegen der unzweifelhaft mit der Ausbreitung verbundenen Abschwächung, schon im Abstand auch nur einer einzigen Wellenlänge vom Oszillator nur bei sehr großem Energieaufwand noch merkliche Intensität erwarten. Daher war die Einführung des geradlinigen Oszillators (408, Abb. 86) mit Schwingungsdauern von der Größenordnung ${}^1/_{100000000}$ sek wesentlich; denn die zugehörige Wellenlänge beträgt nur 3 m, was gute Entwicklungsmöglichkeit und Untersuchungsmöglichkeit der Wellen in verfügbaren Räumen bedeutet. Zudem hat der geradlinige Oszillator auch ein viel offeneres, zur Ausbreitung in die Ferne geeigneteres Kraftfeld als der Kreis von Kleistschen Flaschen, mit den zumeist sehr kurzen, im Glas der Flasche verlaufenden elektrischen und den durch den Drahtkreis zusammengefaßten magnetischen Kraftlinien.

[1]) S. Anhang E V b.

412. Drahtwellen. — Am aussichtsreichsten schien es zunächst, die Kraftlinien an Drähten entlang laufen zu lassen, wie es bei jedem gewöhnlichen elektrischen Strom der Fall ist (93, 125), und zuzusehen, ob bei schnell wechselnder Ladung des einen Drahtendes Wellen in seiner Länge sich zeigen. Zum Nachweis sind stehende Wellen am geeignetsten, weil deren Knoten und Bäuche leicht nachzuweisende Kennzeichen des Vorhandenseins von Wellen und zugleich einfache Mittel zur Feststellung der Wellenlänge sind, was für alle Arten von Wellen gilt und bei den Schallwellen schon deutlich wurde (A 78 u. f.).

Die Einrichtung ist folgende: Der Oszillator O O, rechts in der Abb. 89a von der Kante her zu sehen, ist von derselben Art wie in Abb. 86, nur hier etwas kleiner. Seinen Platten gegenüber stehen isoliert zwei kleinere Platten, deren leitende Fortsetzung die beiden parallel ausgespannten, in der Abbildung als stark ausgezogene Linien erscheinenden Drähte sind.

Nehmen wir zuerst an, daß diese Drähte nach links sehr weit sich erstrecken, so daß die an ihnen entlang laufenden Wellen infolge des Leitungswiderstandes der Drähte sich erschöpfen, ehe sie das ferne Ende der Drähte erreichen. Man hat dann fortlaufende Wellen an den Drähten. Der Vorgang ist folgender: Die während der Schwingung abwechselnd entgegengesetzt aufgeladenen Platten des Oszillators laden die ihnen gegenüberstehenden Platten durch Influenz ebenfalls mit wechselndem Zeichen auf[1]), wie es in der Abbildung für einen mit 0 bezeichneten Augenblick dargestellt ist. Die nicht durch Influenz festgehaltene, entgegengesetzte Elektrizität der Platten läuft jedesmal in dem betreffenden Draht ab. So erhalten die beiden Drähte von ihren rechten Enden aus Ladungen, die in der Periode des Oszillators nach Stärke und Zeichen wechseln; dabei sind die beiden Drähte stets einander entgegengesetzt geladen, so daß die Kraftlinien ihrer Ladungen auf kurzer Strecke von einem Draht zum andern laufen, wie es in der Abb. 89a am rechten Ende der Drahtleitung dargestellt ist. Während diese Kraftlinien im Hinauslaufen längs den Drähten nach links begriffen sind, folgen ihnen schon im Verlauf einer halben Schwingungsdauer des Oszillators entgegengesetzte Kraftlinien nach, und dies wiederholt sich weiter, so daß die ganze Folge abwechselnd entgegengesetzt gerichteter Kraftliniengruppen mit entsprechenden Ladungen der Drähte an diesen unterwegs sich befindet, wie es die Abb. 89a in einem Augenblicksbild darstellt. Dies ist die elektrische Drahtwelle.

Die Wellenlänge λ, der Abstand von einem Zustand zwischen den Drähten bis zum nächstfolgenden gleichen, gerechnet wie es für Wellenlängen immer der Fall ist (A 5), ist durch die Schwingungsdauer T des Oszillators und die Laufgeschwindigkeit c der Kraftlinien bestimmt nach der für alle Wellen geltenden Gleichung $c = \lambda/T$. Daß c, die Laufgeschwindigkeit von Kraftlinien an geradlinigen Drähten ohne wesentliche Kapazität nahe gleich der Lichtgeschwindigkeit ist, dies weiß man aus alten Messungen (126)[2]), und danach ist bei bekannter Schwingungsdauer T die Wellenlänge im voraus abschätzbar, wie vorher angegeben (411).

[1]) Man nennt dies „elektrische Koppelung" der Drahtleitung mit dem Oszillator, weil das Mitschwingen hier durch die elektrischen Kraftlinien bewirkt wird, welche zwischen Oszillatorplatten und Gegenplatten verlaufen. Für die andere Schwingungskoppelungsart zweier Leiter, die magnetische, ist der Resonatorkreis Abb. 87 am Oszillator ein Beispiel; es sind hier die um beide Leiter gehenden magnetischen Kraftlinien, welche, wie beschrieben (409), durch Induktion die Koppelung, das Mitschwingen, herstellen.

[2]) Auch aus zusammengefaßter allgemeiner Kenntnis folgt nahe Lichtgeschwindigkeit für die Drahtwellen, wie im Anhang V b, 9 gezeigt.

Die laufenden elektrischen Kraftlinien sind nach dem elektrodynamischen Zusammenhang (328) unvermeidlich von magnetischen Kraftlinien begleitet, die senkrecht zu den elektrischen und zur Laufrichtung, also in der Abbildung senkrecht zur Zeichenebene stehen. Die Orte der stärksten elektrischen Kraft, zwischen den stärkst geladenen, mit + und — bezeichneten Drahtstellen, sind auch die Orte stärkster magnetischer Kraft; die Orte mitten zwischen je zwei solchen Stellen sind kräftefrei. In dieser Weise ist die elektrische Welle unzertrennlich von einer mit ihr zusammenfallenden magnetischen Welle begleitet; beide zusammen bilden die laufende elektromagnetische Drahtwelle.

Diese Welle bedeutet Energietransport, wie jede Welle (A 19), und zwar sitzt bei Lichtgeschwindigkeit, wie wir sahen (331), die Hälfte der Energie in den elektrischen, die andere Hälfte in den magnetischen Kraftlinien.

Nachweisbar ist eine solche Welle unmittelbar nicht. Man kann zwar Fünkchen aus den Drähten ziehen, auch durch abgestimmte Resonatoren an ferner Stelle der Drahtleitung das Vorbeiziehen der Wellen bestimmter Schwingungsdauer feststellen; aber Einzelheiten sind bei den steten und an allen Stellen der Drähte gleichen schnellen Wechseln der Zustände nicht merklich. Dies ist anders, sobald man die Wellen stehend macht.

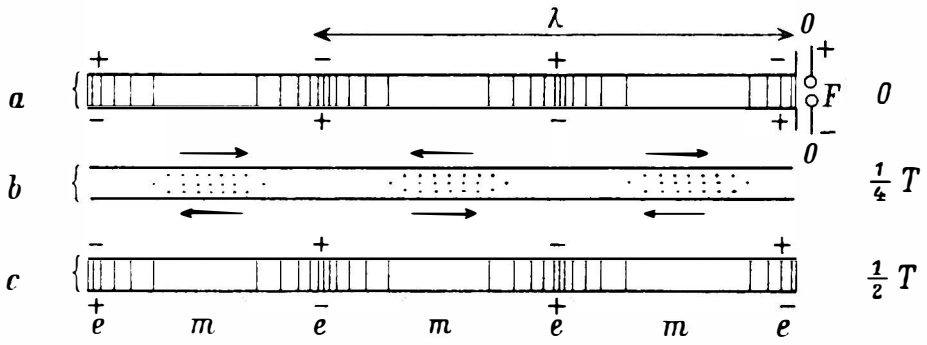


Abb. 89. Stehende elektrische Drahtwellen.

413. Um stehende Wellen an den Drähten zu erhalten, läßt man dieselben in nicht zu großem Abstand vom Oszillator isoliert enden, wie es in den Abb. 89 b, c angenommen ist. Die am Ende ankommenden Kraftlinien bleiben dort einen Augenblick stehen, häufen sich dadurch und drängen daher wieder zurück, so daß das Ende Ausgangspunkt eines zurücklaufenden, „reflektierten" Wellenzuges wird, der dem weiter noch ankommenden direkten Wellenzug entgegen läuft und sich ihm überlagert. Es findet sich dann überall zwischen und an den Drähten die Resultierende der Kräfte der beiden Wellenzüge. Die Ermittelung der Resultierenden erfordert genau die gleichen Überlegungen und führt zu den gleichen Schlüssen, wie die in der Akustik durchgeführte Betrachtung der stehenden Seilwellen oder Schallwellen (A 78 u. f., s. die dortige Abb. 27, Bd. II).

Denn die positiv und negativ gerichteten elektrischen oder magnetischen Kräfte zwischen den Drähten und die Ströme an denselben bilden in derselben Weise Resultierende, wie Quer- oder Längsverschiebungen oder wie Verdichtungen und Verdünnungen bei den genannten materiellen Wellen, was alles seinen Grund nur in der immer bewährten Gültigkeit des Parallelogrammsatzes, d. i. der ungestörten Überlagerung auch für elektrische und magnetische Kräfte seinen

Grund hat (M 45, E 64, 282). Auch die räumliche Verteilung und zeitliche Veränderung der hier zu betrachtenden gerichteten Größen ist in der fortlaufenden elektromagnetischen Welle die gleiche, wie die der mechanischen Größen in der Seil- oder Schallwelle; es entsprechen beispielsweise die Orte entgegengesetzt gerichteter elektrischer Kräfte den Bergen und Tälern eines Seilwellenzuges.

Hiernach ist als Ergebnis der gegeneinanderlaufenden elektromagnetischen Wellen eine stehende Welle mit abwechselnden Bäuchen und Knoten der elektrischen und der magnetischen Kraft und auch der Ströme an den Drähten zu erwarten mit Abständen von ¼ Wellenlänge von Bauch zu Knoten. Maßgebend für die Orte der Bäuche und Knoten ist, daß am isolierten Ende der Leitung ein Bauch der elektrischen Kraft sein muß, d. i. ein Ort größter Schwankung derselben, weil dort die am Weiterlaufen verhinderten elektrischen Kraftlinien sich stauen; dagegen muß ebendort ein Knoten der magnetischen Kraft sein, d. i. ein Ort, an welchem diese Kraft dauernd Null ist, weil dort die elektrischen Kraftlinien stillstehen müssen, so daß ihnen die Begleitung magnetischer Kraft nach dem elektrodynamischen Zusammenhang fehlt. Knoten und Bäuche der elektrischen und der magnetischen Kraft fallen also nicht zusammen, sondern die Knoten der einen Kraft sind die Bäuche der anderen. Dies gibt die Kräfteverteilung, wie Abb. 89 a, b, c sie für die mit 0, ¼T und ½T bezeichneten Zeiten zeigt[1]). Man sieht, daß bei e die Bäuche der elektrischen Kraft sind, bei m ihre Knoten. Die magnetische Kraft, welche senkrecht zur Zeichnungsebene steht, so daß ihre Linien nur als Punkte erscheinen können, hat dagegen bei m ihre Bäuche und bei e ihre Knoten. Jede der beiden Kraftarten schwankt an ihren Bäuchen zeitlich zwischen Extremwerten ihrer Größe hin und her, und sie fehlt dauernd an ihren Knoten. Zur Zeit 0 ist nur elektrische Kraft vorhanden in der gezeichneten Verteilung (Abb. 89a); magnetische Kraft fehlt gänzlich, was dem Ruhen der elektrischen Kraftlinien in diesem Augenblicke 0 entspricht. Ebenso auch zur Zeit ½T (Abb. 89 c), nur daß da die elektrischen Kräfte verkehrte Richtung haben. Dazwischen, zur Zeit ¼T (Abb. 89 b), ist höchste Entwickelung der magnetischen Kräfte vorhanden, während elektrische Kraft von Draht zu Draht vollkommen fehlt. Die Elektrizitäten an den Drähten sind zu dieser Zeit in vollster Bewegung, was die Strompfeile in der Abbildung andeuten. Diesen Strömen gehören auch die zwischen ihren Orten stärkst entwickelten magnetischen Kräfte zu; sie sind ganz der Handregel entsprechend gerichtet oder, was dasselbe sein muß, dem elektrodynamischen Zusammenhang entsprechend, da sie Folge der vorhergegangenen Heranbewegung der elektrischen Kraftlinien von beiden Seiten her an den so entstehenden Bauch der magnetischen Kraft sind. Wir kommen auf Einzelheiten hierzu noch zurück (416).

414. Der *Nachweis* des Statthabens dieser Kräfteverteilung und damit der stehenden Wellen an den Drähten ist durch eingehende Beobachtungen verschiedener Art geführt. Es genügt, einige davon zu nennen.

In sehr einfacher Weise kann man Knoten und Bäuche der *elektrischen* Kraft durch eine Röhre mit verdünntem Gas aufsuchen und nachweisen, wenn man sie quer über die beiden Drähte legt; am Bauche leuchtet sie auf, am Knoten bleibt sie dunkel. Das Aufleuchten ist Nachweis des Vorhandenseins elektrischer Kraft in der schon erläuterten Weise (403). Die *magnetischen* Kraftlinien der stehenden Drahtwellen können die Röhre nicht gut beeinflussen, weil dieselben an ihren Bäuchen, wo sie am stärksten entwickelt sind, ruhen; wohl aber zeigt ein Drahtkreis mit Funkenstrecke die Bäuche magnetischer Kraft an, wenn man ihn so an die Drahtleitung hält, daß er den Kraftlinien senkrecht seine Fläche bietet.

[1]) Oszillator und Platten der Drähte sind in den Abb. b und c weggelassen.

Besonders auffallend ist der Nachweis der Knoten elektrischer Kraft durch Überlegen von Brücken, welche die beiden Drähte leitend miteinander verbinden. Eine solche Brücke kann an einem Knoten elektrischer Kraft nicht stören, weil sie dort nur Punkte der beiden Drähte verbindet, die niemals Spannung gegeneinander haben; an jeder anderen Stelle muß sie aber die Entwickelung der Wellen verhindern, weil sie die dort entgegengesetzt geladenen Drähte entlädt. Um zu sehen, ob die Wellen vorhanden sind, legt man ein Rohr mit verdünntem Gas ans Ende der Leitung, wo es bejahendenfalls dauernd aufleuchtet. Legt man dann eine Drahtbrücke nahe dem Oszillator auf, so erlischt das Leuchten der Röhre. Verschieben der Drahtbrücke bis zum ersten Knoten m (Abb. 89) der elektrischen Kraft läßt aber die Röhre wieder aufleuchten; weiteres Verschieben an fernere Stellen verdunkelt sie wieder. Man kann so den Ort des Knotens sehr scharf aufsuchen. Liegt die Brücke am Knoten, so kann man eine zweite Brücke und auch noch eine dritte oder mehrere an die weiteren Knoten m der elektrischen Kraft bringen — so viele deren vorhanden sind —, ohne daß die Röhre am Ende erlischt, wenn die Knoten gut aufgesucht sind.

In solcher Weise, durch Aufsuchung der Knoten, kann auch eine genaue Wellenlängenmessung ausgeführt werden, welche zusammen mit der Kenntnis der Schwingungsdauer des Oszillators eine Kontrolle der Laufgeschwindigkeit der Drahtwellen liefert.

Die Ströme an den Drähten laufen nur in der äußeren Schicht derselben, wie stets bei hohen Wechselzahlen und guter Leitfähigkeit (Hauteffekt, vgl. 385). Es ist dies für die Drahtwellen auch durch besondere Versuche nachgewiesen.

Zu bemerken ist, daß die Längenbemessung der Drahtleitung nicht gleichgültig ist für gute Ausbildung der stehenden Wellen; denn es muß an beiden Enden ein Bauch der elektrischen Kraft sein, was eine Gesamtlänge von einer ganzen Anzahl halber Wellenlängen bedingt. Es ist dies ähnlich wie bei den stehenden Seilwellen oder Luftwellen (A 79). Wie dort, so kann aber auch hier bei den elektrischen Wellen eine Eigenschwingung der Drahtleitung erregt werden, so daß dieselbe mit mehr oder weniger Knoten nach Maßgabe ihrer dann beliebigen Länge schwingt, ganz entsprechend den verschiedenen möglichen Eigenschwingungen der Luftsäule in einer Pfeife (A 107). Solche Erregung der Drahtleitung bei beliebiger Länge tritt um so leichter ein, je größer die Dämpfung des Oszillators ist; derselbe wirkt dann nur durch einen ersten „Stoß", ein Bündel von Kraftlinien in die Leitung sendend, das dann oftmals an derselben hin und her reflektiert, eine stehende Welle ergibt im einfachsten Fall mit einem Knoten der elektrischen Kraft in der Mitte. Bringt man ans Ende der Drahtleitung eine Brücke, so ist dort ein Knoten der elektrischen, ein Bauch der magnetischen Kraft, und es können in leicht verständlicher Weise dann ebenfalls stehende Wellen auftreten. Auch sonst lassen sich alle Analogien zu den Schallwellen in offenen und geschlossenen Röhren bei den elektromagnetischen Drahtwellen verwirklichen.

415. Verhalten der mit Lichtgeschwindigkeit querbewegten Kraftlinien. — Da die angegebenen Eigenschaften der elektromagnetischen Drahtwellen durch die Erfahrung eingehend gesichert festgestellt sind, ist es angebracht, das Verhalten der Kraftlinien, das diese Eigenschaften ergibt und das Besonderheiten zeigt, die bei ruhenden oder langsam bewegten Kraftlinien nicht hervortreten, näher zu betrachten. Die Grundzüge des Verhaltens der Kraftlinien bei schnellen Bewegungen und bei ihren durch den elektrodynamischen Zusammenhang gegebenen Umwandlungen werden nirgends besser deutlich als in den einfachen Fällen der fortlaufenden und der stehenden elektrischen Wellen.

Es zeigt sich an den Drahtwellen, die wir an den Abb. 89 betrachtet haben (412, 413), daß das Drängen der Kraftlinien (83, 87) verschwindet, sobald sie Querbewegung mit Lichtgeschwindigkeit haben. Mit dem

Drängen der gleichgerichteten Kraftlinien verschwindet bei Lichtgeschwindigkeit auch das Zusammengehen entgegengesetzt gerichteter Kraftlinien, welches wir bei den Umformungen von Kraftlinien bewegter Leiter bemerkt hatten (85). Dies gilt für die elektrischen wie für die zu ihnen senkrechten magnetischen Kraftlinien. Denn beide behalten ihre Gruppierung innerhalb der Welle bei, wie sie vom Ursprungsort der Welle aus gegeben ist; es findet weder Auseinanderweichen der gleichgerichteten Kraftlinien von ihren dichtesten Stellen, noch Zusammengehen der benachbarten entgegengesetzt gerichteten Kraftlinien statt, welches beides eine Verwischung des Wellenzuges ergeben würde. Sondern der Wellenzug behält seine Kraftlinienverteilung dauernd bei, während er beliebig weiterläuft. Dies wird in völlig reiner Form, ohne die Mitwirkung der Drähte, welche die Geschwindigkeit herabsetzen und den Kraftlinien Energie nehmen, gezeigt und zugleich aufs eingehendste gesichert durch die alsbald zu behandelnden Wellen im freien Raum, deren alltäglich gewordene Anwendungen zur Schallübertragung (432) keine Änderungen der Wellenzüge während der Laufzeit erkennen lassen. Dabei zeigen diese Wellen im freien Raum durch ihr unverändertes Fortschreiten gleichzeitig, daß mit dem Drängen auch der Zug der Kraftlinien (83, 87) verschwindet, wenn sie in Querbewegung mit Lichtgeschwindigkeit begriffen sind (s. 421).

Eine aus dem Verschwinden des Drängens folgende Eigentümlichkeit elektrischer Kraftlinien bei Lichtgeschwindigkeit — ihre Umgruppierung betreffend — betrachten wir später (464, 482).

416. Verwandlungen und Bewegungen der Energie in den stehenden elektrischen Wellen. — Während bei den fortlaufenden Wellen dauernd die Hälfte der Energie in den elektrischen, die andere Hälfte in den magnetischen Kraftlinien sitzt, wie es der Fortbewegung mit Lichtgeschwindigkeit entspricht (343), findet bei den stehenden Wellen stete Umwandlung der beiden Kraftlinienarten mit ihrem Energieinhalt statt. Dabei schwankt die Energie — bewegt mit den Kraftlinien (vgl. 122 u. f., 273 u. f.) — dauernd im Raum zwischen und um den Drähten längs je ¼ Wellenlänge hin und her. Sie ruht in den in Abb. 89 dargestellten Augenblicken; sie hat schnellste Bewegung in den Zwischenzeiten, wobei die Umwandlung von der einen Form in die andere stattfindet (328 u. f.); sie häuft sich bei ihren Umkehren je einmal in elektrischer Form an den Bäuchen der elektrischen Kraft und einmal in magnetischer Form an den Bäuchen der magnetischen Kraft.

Ganz dasselbe Schwanken von Energie längs ¼ Wellenlänge kommt auch in der stehenden Luftwelle eines Rohres vor, wo die Energie je einmal als potentielle Energie an den Bäuchen des Drucks und einmal als kinetische Energie an den zwischenliegenden Bäuchen der Bewegung (welche Knoten des Drucks sind) sich häuft (A 80). Auch die Luft schwankt in der stehenden Luftwelle, aber mit der doppelt so großen Amplitude von ½ Wellenlänge zwischen je zwei Bäuchen des Druckes. Dem entspricht bei der elektrischen Drahtwelle das Schwanken der Elektrizität an den Drähten zwischen je zwei Bäuchen der elektrischen Kraft, so daß die positive Ladung bald an dem einen, bald ½ Schwingungsdauer später an dem anderen Bauche sich häuft.

Das Stattfinden von Schwingungen der Energie entspricht den Tatsachen, daß die Energie des elektromagnetischen Feldes Trägheit besitzt (367) und daß

Energieanhäufung Druck bedeutet (M 376), was beides noch weiter sich zeigt (434, 433). Reines Schwanken von Energiemassen, ohne Bewegung von Elektrizitäten, findet man in den alsbald zu betrachtenden stehenden freien elektrischen Wellen.

417. Freie elektrische Wellen. — Auch die in der schon überlegten Weise um jeden einfachen, gradlinigen Oszillator von nicht zu großer Schwingungsdauer zu erwartenden freien elektrischen Wellen (410) sind aufgefunden und in ihren Einzelheiten studiert worden (H. Hertz 1888). Sie laufen im Luftraum, ohne Drähte. Das Vorhandensein der Luft ist aber — wie überhaupt für elektrische und magnetische Kraftlinien — unwesentlich; die freien Wellen sind ganz Erscheinungen des materiefreien Raums. Sie bestehen in der erwarteten Weise in Bündeln elektrischer Kraftlinien, die, aus dem Oszillator gekommen, infolge ihres Drängens Querbewegung angenommen haben und dann weiter gelaufen sind, begleitet von den, zu ihnen und der Laufrichtung senkrechten, nach dem elektrodynamischen Zusammenhang ihnen zugehörenden Magnetkraftlinien. So wie der Oszillator in der schon eingehend betrachteten Weise schwingt (408), kommen immer wieder neue Bündel elektrischer und zugehöriger magnetischer Kraftlinien in wechselnder Richtung mit je ½ Schwingungsdauer Zwischenzeit aus ihm heraus, entsprechend seinen wechselnden Ladungen, und laufen den vorangegangenen in Abständen von je ½ Wellenlänge nach. Solche Wellenausbreitung ist in der ganzen, senkrecht durch die Mitte der Schwingungsbahn gehenden Ebene zu erwarten; denn in dieser Ebene breiten sich die den Ladungen der Oszillatorenden zugehörigen, Abb. 79 in Bd. III entsprechenden Kraftlinien quer aus. Die Ausbreitungsrichtungen — Strahlrichtungen — der Welle, wie FW in Abb. 90, gehen in dieser Ebene von der Mitte F des Oszillators O O aus radial auseinander, und senkrecht zum Strahl stehen überall die Kraftlinien beider Arten, wie es dem elektrodynamischen Zusammenhang entspricht; das Schwingende, periodisch sich Verändernde in der Welle steht also senkrecht zu ihrer Laufrichtung, d. h. die Welle ist transversal (A 10), wie Lichtwellen es sind (O 167). Die elektrische Kraft muß längs FW parallel O O sein, wie die Linie e e an dem im Strahl aufgestellten, untersuchenden Resonator (409) R; die magnetische Kraft fällt in die Linie f m. Ob die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser freien Wellen Lichtgeschwindigkeit ist, wie nahezu

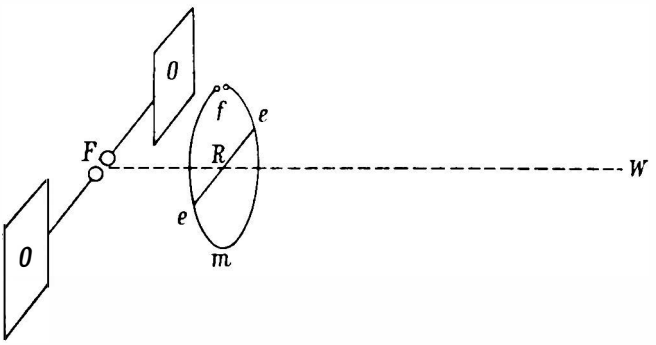


Abb. 90. Nachweis der elektrischen Wellen im freien Raum.

bei den Drahtwellen, dies kann nur aus der Beobachtung festgestellt werden. Hierzu sind wieder stehende Wellen am dienlichsten (420), zu deren Herstellung wieder Reflexion das einfache Mittel ist.

418. Reflexion der freien Wellen. — Daß an leitenden Wänden etwas wie Reflexion der gesuchten Wellen eines Oszillators stattfindet, und zwar mit Umkehr der Phase der elektrischen Kraft, wie Schallwellen mit Umkehr der Phase der Bewegung von festen Wänden reflektiert werden (A 31), dies zeigte die Beobachtung mittels kreisförmigen Resonators (409) in der Nähe von Wänden. Wird ein solcher Resonator mit seiner Ebene in der Schwingungsebene der beiden Kräfte, und mit seiner Funkenstrecke f oben, aufgestellt, wie R in Abb. 90, so wirken die elektrischen Kräfte der Welle auf ihn. Sie bringen die Elektrizitäten in seinem unteren, ununterbrochen leitenden Teil e m e in Bewegung und damit den ganzen Kreis in Mitschwingung, was durch Fünkchen bei f merklich wird. Die magnetischen Kräfte der Welle bleiben bei dieser Lage des Resonators unwirksam, weil keine der stets in die Linie m f fallenden Magnetkraftlinien die Kreisfläche durchsetzt. Fünkchen bei f sind somit Zeichen des Vorhandenseins der elektrischen Kraft der Welle am Orte des Resonators. Verschiebt man den Resonator parallel zu seiner Ebene längs des Strahles F W, so erhält man bis auf große Entfernungen hin Fünkchen. Befindet sich aber bei W eine leitende, etwa mit Blech bekleidete Wand, senkrecht zum Strahle stehend, so fehlen die Fünkchen in der Nähe dieser Wand, während sie in einigem Abstand von derselben verstärkt erscheinen. Dies zeigt an, daß Reflexion stattgefunden hat mit Ausbildung einer stehenden Welle und zwar so, daß an der Wand ein Knoten der elektrischen Kraft sich befindet mit dem zugehörigen Bauch im Abstand von ¼ Wellenlänge von der Wand.

Der Knoten der elektrischen Kraft, d. h. das dauernde Fehlen elektrischer Kraft an der leitenden Wand, entsprechend der Phasenumkehr bei der Reflexion, war zu erwarten, weil die parallel zum Leiter ankommenden elektrischen Kraftlinien in ihm unter Strombildung verschwinden müssen; ihre Energie ist dann im Strome mit dessen magnetischer Kraft vorhanden, weshalb letztere Kraft an der Wand nicht Null wird, sondern dort einen Bauch hat.

Ohne die Einzelheiten dieses Vorganges an der leitenden Wand zu verfolgen, ist es klar, daß die in den Leiter kommende, periodisch wechselnde elektrische Kraft der Welle Ströme von gleicher Periode in ihm zur Folge haben muß, daß somit der Leiter, während er die Welle empfängt, selber Oszillator sein muß; jeder Raumteil an seiner Oberfläche wird ein neuer Wellenmittelpunkt. Damit ist die Anwendung von Huygens' Prinzip (O 38) auf das weitere Geschehen von der Oberfläche aus gegeben. Man hat das Reflexionsgesetz für die Richtung der von der Oberfläche ausgehenden neuen, reflektierten Welle bei beliebiger Richtung der einfallenden Welle (O 40) gültig zu erwarten, und die Beobachtung zeigt in der Tat Reflexion nach diesem Gesetz (428).

419. Trifft die einfallende Welle auf ein Dielektrikum, so bewirken die ankommenden elektrischen Kräfte dielektrische Verschiebungen (17) in demselben, die als Elektrizitätsbewegungen die gleichen weiteren Wirkungen haben wie die Ströme im Leiter. Es enthält dann jedes Raumelement des Dielektrikums im Takte der ankommenden Welle schwingende Elektrizitäten und wirkt somit als neuer Wellenmittelpunkt im Sinne von Huygens' Prinzip, womit die Reflexion samt ihrem Winkelgesetz (vgl. 428) auch an Nichtleitern erklärt ist.

Da die Dielektrizitätskonstante Maß für die Verschieblichkeit der Elektrizität in einem Medium

ist (113), so ist zu verstehen, daß Stoffe mit großer Dielektrizitätskonstante in bezug auf Reflexion an ihren Grenzflächen ähnlich den Metallen sich verhalten; sie kehren ebenfalls die Phase der elektrischen Kraft um (vgl. 431). Da große Dielektrizitätskonstanten auch große Brechungsexponenten für lange Wellen bedingen (429), trifft hier das in der Optik bemerkte Verhalten zu, daß „am optisch dichteren Medium Phasenumkehr der elektrischen Kraft bei Reflexion stattfindet" (O 126). Eingehenderes über die Vorgänge der Reflexion und des Eindringens der Wellen bei dielektrischen Körpern und Metallen ist weiter unten bemerkt (426, 431).

Enthält das Dielektrikum Elektrizitäten mit bestimmten Eigenschwingungsdauern, so daß sie mit Wellen gleicher Schwingungsdauer resonanzfähig sind (A 82), so tritt der schon in der Optik betrachtete Fall der selektiven (auswählenden) Reflexion ein (O 55, 88). Diese Reflexion ist wegen des mit der Resonanz verbundenen, besonders starken Mitschwingens stark, wie die Reflexion an Leitern (metallische Reflexion). Die in dieser Weise (sowie auch durch Absorption, vgl. 426 und O 85) untersuchbaren Eigenschwingungsdauern von elektrisch geladenen Atomen und Atomgruppen in chemischen Verbindungen liegen im Ultrarot oder bei noch längeren Wellen; im letzteren Falle sind sie auch durch Messungen der Dielektrizitätskonstante mit elektrischen Schwingungen aufsuchbar (vgl. 113, 397).

420. Stehende freie Wellen. — Die Reflexion an metallischen Wänden war sogleich benutzbar, um das Vorhandensein und die gute Ausbildung der Wellen um einen Oszillator mittels stehender Wellen eingehend nachzuweisen und die Wellenlänge zu messen.

Knoten und Bäuche der elektrischen Kraft werden mittels des vertikal, wie in Abb. 90 aufgestellten kreisförmigen Resonators in der schon beschriebenen Weise aufgesucht (418). Die Knoten und Bäuche der magnetischen Kraft können mit horizontal gelegtem Resonatorkreis gesucht werden, so daß er die vertikal stehenden Magnetkraftlinien umfaßt, wie es in Abb. 87 der Fall ist und dort schon erläutert wurde (409).

Man findet, wie schon bemerkt (418), an der Wand einen Knoten der elektrischen Kraft und weitere Knoten mit dazwischenliegenden Bäuchen in regelmäßigen Abständen von der Wand. Die magnetische Kraft hat dagegen an der Wand einen Bauch und weiter Knoten und Bäuche ebenfalls in regelmäßigen Abständen und zwar — wie es schon an der Wand der Fall ist — so, daß die Knoten der elektrischen Kraft überall Bäuche der magnetischen Kraft sind und umgekehrt. Es ist dies alles wie bei den stehenden Drahtwellen (413). Über die Kraftlinien der stehenden freien Wellen s. 424.

Wichtig war die so ermöglichte Messung der Länge der freien Wellen als doppeltem Abstand je zweier benachbarter Knoten oder Bäuche gleicher Art. Es zeigte sich hierbei die Wellenlänge nahe ebenso groß wie die von Drahtwellen desselben Oszillators, und da an Drähten die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektrischer Kraft schon als nahezu Lichtgeschwindigkeit gemessen war (126), konnte zum erstenmal geschlossen werden, daß auch die freien Wellen nahe oder genau mit Lichtgeschwindigkeit sich ausbreiten. Es konnten später verfeinerte Messungen ohne Zuhilfenahme der Drahtwellen ausgeführt werden, bei Ermittelung der Schwingungsdauer des Oszillators aus Beobachtung seiner Funken in sehr schnell gedrehtem Spiegel (396, 409), so daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = \lambda/T$ unmittelbar aus gemessener Wellenlänge λ und Schwingungsdauer T als gleich der Lichtgeschwindigkeit sich ergab.

Es waren das höchst wichtige Feststellungen. Die einfachen Gedanken vom Bestehen transversaler Wellen elektrischer Kraft (410) haben sich hier der Wirklichkeit entsprechend gezeigt. Und die Wellen laufen tatsächlich mit derselben

Geschwindigkeit wie die ebenfalls transversalen Lichtwellen. Licht und Elektrizität haben sich so zum erstenmal in festem Zusammenhang stehend gezeigt: Es ist derselbe Äther, in welchem elektrische und magnetische Kraftlinien und das Licht sich ausbreiten.

Von hier ab war weiterer Fortschritt schnell erreichbar. Die Identität dieser elektrischen Wellen und der Lichtwellen — bis auf den Unterschied in der Wellenlänge — war auch im einzelnen nachweisbar (425 u. f.) und eine Reihe von wichtigen Schlüssen folgte (422, 431, 433 u. f.). Die technischen Anwendungen im drahtlosen Nachrichtenwesen blieben dann auch nicht aus (432).

421. Die freien Wellen nach Maxwells Gleichungen. — Die Überlegungen, welche die Haupteigenschaften elektromagnetischer Wellen aus einfachen Kenntnissen verstehen ließen, waren einfach (410). Will man aber aus eben diesen Kenntnissen Einzelheiten über die Wellen folgern, so ist die Hilfe der Mathematik erforderlich, angewandt auf die in Maxwells Gleichungen vorliegende mathematische Zusammenfassung dieser Kenntnisse (406). Es ergibt sich dabei folgendes[1]):

Die Geschwindigkeit c der Wellen zeigen die Gleichungen sehr bemerkenswerterweise gegeben durch das Verhältnis der elektrostatischen zur elektromagnetischen Einheit der Kräfte (264), welches Verhältnis schon vorher aus rein elektrischen Messungen gleich der Lichtgeschwindigkeit gefunden war (300). Dies kommt gleich der Feststellung eines tief gegründeten Zusammenhangs zwischen den Erfahrungen an den neu hergestellten elektrischen Wellen, an denen diese Geschwindigkeit nun unmittelbar gemessen wurde (420), und den alten Kenntnissen über Elektrizität und Magnetismus.

Ist der Raum nicht materiefrei, sondern mit einem Stoff von der Dielektrizitätskonstante ε und der Permeabilität μ erfüllt, so ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit gegeben durch $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$.

Für den eigentümlichen Vorgang des Herauskommens der Welle aus dem Oszillator und für ihre Entwickelung auch seitwärts vom Oszillator geben die Gleichungen das in den Abb. 91 in Augenblicksbildern der elektrischen Kraftlinien dargestellte Ergebnis für Zeiten, die um je $^1/_8$ Schwingungsdauer voneinander abstehen. Der im Mittelpunkt mit seinen zwei Endkugeln angedeutete Oszillator ist dabei sehr kurz angenommen, und seine allernächste, in den kleinen Kreis eingeschlossene Umgebung ist nicht dargestellt. Die Pfeile beim Oszillator geben seine Stromrichtung, die Zeichen seine Ladungen an. Die Kraftlinien sind ebenfalls mit Pfeilen versehen, entsprechend der Kraftrichtung für positive Elektrizität.

In Abb. 91a (Zeit 0) gehen keine elektrischen Kraftlinien vom Oszillator aus; derselbe ist also in diesem Augenblick ungeladen, hat aber stärksten Strom (entsprechend Abb. 86b); die vorhandenen Kraftlinien rühren von der vorhergegangenen Schwingung her. In Abb. 91b (Zeit $\frac{1}{8}$T) hat sich unter Verminderung des Stromes bereits Ladung an den Endkugeln des Oszillators gesammelt; die zugehörigen Kraftlinien sind fast wie bei ruhenden Ladungen geformt (Abb. 79, Bd. III), jedoch greifen sie nicht wie bei diesen bis ins Unendliche aus, sondern sie sind über die in der Abbildung b erscheinende Kugel k k noch nicht hinausgekommen.

[1]) S. Anhang E V b.

In Abb. 91 c (Zeit $\frac{1}{4}$T) ist diese Kugel schon erweitert, die Kraftlinien greifen weiter aus; sie haben sich auch vermehrt, was der inzwischen vermehrten Ladung der Oszillatorenden entspricht. Die Ladung hat jetzt auch schon ihren Höchstwert erreicht (entsprechend Abb. 8. c). Nun tritt das Besondere ein, betreffend die Frage: wie die Kraftlinien mit der nun wieder verschwindenden Ladung des Oszillators verschwinden sollen. Sie können sich hier nicht ganz wieder in den Leiter zurückziehen; denn ihre äußeren Teile sind in heftiger Bewegung nach

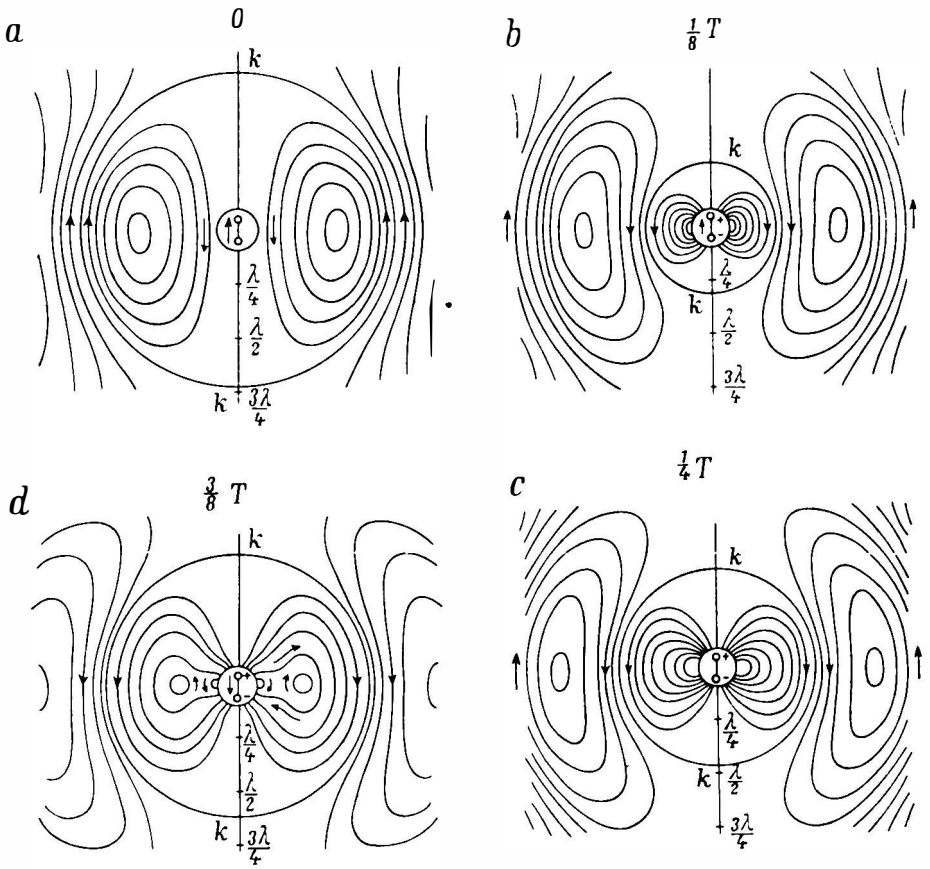


Abb. 91. Elektrische Kraftlinien einer Schwingung.

außen hin begriffen, und sie enthalten Energie, die Trägheit hat. Weiß man letzteres, daß Energie Trägheit, Masse hat (367, 434), so ist das nun erfolgende merkwürdige Abreißen der bereits fortbewegten Teile des Feldes von dem Rest, der bei der Entladung des Leiters in ihn zurücksinkt, unmittelbar verständlich. Maxwells Gleichungen geben auch die Einzelheiten des Abreißvorganges, wovon die Abb. 91 d ein Augenblicksbild zeigt (Zeit $\frac{3}{8}$T). Es bilden sich Einbuchtungen in der Nähe des Oszillators an den Kraftlinien aus, und die dabei einander nahekommenden entgegengesetzt gerichteten Teile der Kraftlinien formen sich um, wie wir es schon früher (85) betrachtet und dort in Abb. 84

(Bd. III) dargestellt haben[1]). Es erfolgt hierbei Abschnürung in sich geschlossener elektrischer Kraftlinien, die nun ihre Auswärtsbewegung fortsetzen, während die am Leiter gebliebenen Reste in ihn zurücksinken. Es sinken demnach ebensoviel Kraftlinien in den Leiter zurück als von ihm ausgegangen waren; aber die Energie der zurücksinkenden Teile ist vermindert um die Energie der abgetrennten, in den Raum hinauseilenden Teile. Der Oszillator hat diese Energie verloren, und wenn ungedämpfte Schwingung vorausgesetzt wird, so muß ihm fortdauernd Energie zugeführt werden.

Man sieht hier, daß nicht nur der Funken und der sonstige Leitungswiderstand des Oszillators Energie verbraucht, sondern daß seine Wellen eine wesentliche Energieabgabe sind.

Noch $^1/_8$ Schwingungsdauer später haben alle Kraftlinien die Formen wie in Abb. 91 a, nur mit verkehrten Richtungen, und auch für die nächstfolgenden Zeiten gelten die weiteren Abbildungen b, c, d mit überall verkehrten Pfeilen und Zeichen, bis nach Verlauf einer vollen Schwingungsdauer (Zeit T) wieder das unveränderte Bild a gilt. Unterdessen eilen die bereits abgesonderten Kraftlinienringe einander nachfolgend und seitlich sich erweiternd hinaus. Überall bewegen sich die Kraftlinien quer zu ihrer eigenen Richtung (vgl. 125). Jede Ringgruppe bedeutet eine halbe Wellenlänge. In großen Entfernungen vom Oszillator ergeben die Ringe nahezu parallele Gruppen von abwechselnd gerichteten Kraftlinien, ebene Querwellen.

In der Richtung der Schwingung selbst, longitudinal, ist die Kraft überall Null. Die Kraft nimmt seitwärts von der reinen Querwelle überall ab, wie es die dort vergrößerten Abstände der Kraftlinien zeigen. Es gibt nach Maxwells Gleichungen keine longitudinalen elektrischen oder magnetischen Wellen, und es sind solche auch stets nur vergeblich gesucht worden.

Die magnetischen Kraftlinien sind überall Kreise, die senkrecht zu den elektrischen Kraftlinien und mit ihrer Ebene senkrecht zur Zeichnungsebene stehen; ihre Richtung folgt dem elektrodynamischen Zusammenhang.

Die fertig gebildeten Wellen gehen mit Lichtgeschwindigkeit quer zu ihren Kraftlinien in den Raum. Nur in der Nähe des Oszillators haben die Kraftlinien nach den Gleichungen teilweise größere Quergeschwindigkeiten. Man sieht dies an dem beigezeichneten Wellenlängenmaßstab. Darnach erscheint es in Maxwells Gleichungen, also im elektrodynamischen Zusammenhang und den sonstigen Kraftlinieneigenschaften eingeschlossen, nicht nur daß fertig gebildete freie Kraftlinien mit Lichtgeschwindigkeit quer zu ihrer Richtung laufen, sondern auch daß zeitweilig, bei Umbildungen der Kraftlinien, auch andere Geschwindigkeiten vorkommen können, besonders auch Überlichtgeschwindigkeit[2]). Letzteres zeigten auch die bei Metallen beobachteten Brechungsexponenten unter 1 (O 88), die ebenfalls Überlichtgeschwindigkeit bedeuten, wieder aber nur auf kurzen Strecken vorkommend, auf die das Licht im stark absorbierenden Metall beschränkt ist.

Die Kraftlinien der Wellen erhalten ihre Quergeschwindigkeit durch ihr seitliches Drängen; haben sie Lichtgeschwindigkeit erreicht, so verschwindet dieses Drängen, so wie auch der Zug der Kraftlinien (vgl. 415). Letzteres wird aus dem dauernden, selbständigen Fortbestehen der Kraftlinienringe auf beliebig langem Wege klar. Es gilt aber das Verschwinden des Zuges nur für mitbewegte Kraftlinienteile, nicht für ruhende Elektrizi-

[1]) Querbewegung mit Lichtgeschwindigkeit, welche das Zusammengehen der entgegengesetzt gerichteten Kraftlinien aufheben würde (415), ist an diesen Stellen nicht vorhanden.

[2]) S. dazu Anhang E V b, 7.

täten, an denen die Welle vorbeiläuft; man erkennt dies an dem Mitschwingen der Elektrizitäten in ruhenden dielektrischen Körpern mit den Wellen, auch des Lichtes, dessen Statthaben durch die vielen damit zusammenhängenden Erscheinungen (419, O 88) erwiesen ist.

Eine Untersuchung des elektromagnetischen Feldes um einen linearen Oszillator — soweit sie mit Hilfe des kreisförmigen Resonators (418, Abb. 90) in seinen verschiedenen Lagen ausführbar war — hat die Kraftlinienläufe der Abb. 91 bestätigt.

422. Elektrische und magnetische Kräfte sind keine Fernkräfte. — Vergleicht man die räumliche Verteilung der elektrischen und magnetischen Kräfte in einigem Abstand vom Oszillator mit dem, was die Abstandsgesetze für Elektrizitäten (14) und für Stromelemente (279) erwarten ließen, so sieht man besonders deutlich das schon von vornherein angemerkte Versagen dieser Gesetze für veränderliche Ladungen und Ströme (61, 281, 322).

Man beachte z. B. die elektrischen Kräfte in Abb. 91c. Die Endkugeln des Oszillators haben zu dieser Zeit ($\frac{1}{4}$T) die dort vermerkten vollen Ladungen. Coulombs Gesetz würde im ganzen Raume Kräfte dieser Ladungen angeben, deren Richtungen durch die Kraftlinien der Abb. 79 in Bd. III dargestellt sind; im besonderen würde die Kraft auf der Linie senkrecht zum Oszillator überall die Richtung des Pfeiles in der Gegend des Kreises k in Abb. 91 c haben. Diese Richtung gilt aber in Wirklichkeit zwar dicht beim Oszillator und innerhalb sowie auch ein wenig jenseits des Kreises k; nur wenig weiter ist aber Kraft der entgegengesetzten Richtung vorhanden, wie der Pfeil am Rand der Abb. 91 c anzeigt, obgleich zur selben Zeit die angezeigten Ladungen der Kugeln bestehen. Man sieht hier deutlich, daß Elektrizitäten überhaupt keine Fernkräfte ausüben, daß ihr bloßes Vorhandensein an einem Orte gar nicht genügt — nicht bestimmend ist — für das Vorhandensein bestimmter Kräfte an den anderen Orten des Raumes. Wohl aber kann bei gegebenen Elektrizitätsbewegungen die Verteilung der Kräfte im ganzen Raum durch Kraftlinien der bekannten Eigenschaften — wie sie in Maxwells Gleichungen enthalten sind — richtig dargestellt werden. Coulombs Abstandsgesetz gilt nur für den Fall lange genug schon in Ruhe (im Äther des Orts) gewesener Ladungen, so daß deren Kraftlinien Zeit gehabt haben, bis zum betrachteten Punkte sich auszubreiten und dort zur Ruhe zu kommen. Man kann sagen, daß die durch Coulombs Gesetz angezeigten Kräfte sich verspäten; doch liefert dies nur ungefähr richtige Angaben. Wenigstens der Richtung nach trifft es aber zu, daß die am Rande der Abb. c vermerkte Kraft von den ½ Schwingungsdauer früher am Oszillator gewesenen Ladungen herrührt. Solche Verspätungserscheinungen zeigen an, daß mit Trägheit wirkende Vorgänge im Raum die betreffenden Kräfte vermitteln, wie es im Fall der elektrischen Kräfte die mit Masse versehenen, durch die Kraftlinien dargestellten Energieverteilungen im Raume sind.

Dasselbe trifft auch für die magnetischen Kräfte zu, die, wie wir sahen (328), Stromwirkungen sind. Das Stromelementengesetz würde beispielsweise in dem in Abb. 91 a dargestellten Augenblick, wo der Oszillator stärksten Strom hat, überall Kräfte von einerlei Drehrichtung, entsprechend der Handregel, um das Stromelement anzeigen, welches der Oszillator tatsächlich ist. In Wirklichkeit sind Kräfte dieser Richtung zu dieser Zeit zwar dicht beim Oszillator vorhanden;

½ Wellenlänge weiter sind sie gleichzeitig von entgegengesetzter Richtung, wie es die nachgewiesenen Wellen (sowie der elektrodynamische Zusammenhang) anzeigen. Man sieht hier, wie das Stromelementengesetz sogar in dem hier vorliegenden Falle der Verwirklichung eines Stromelements versagt, ausgenommen nur in genügender Nähe des Stromes, wo die Verspätungen unmerklich sind. Auch die magnetischen Kräfte sind somit keine Fernkräfte.

Nur die Gravitation hat unter den bekannten Kräften keine Verspätungen gezeigt. So ist zu denken, daß sie, obgleich auch nach einem Entfernungsquadratgesetz wirkend, von anderer Art ist als die elektrischen und magnetischen Kräfte (vgl. M 214).

423. Elektrische Wellen ein häufiger Vorgang. — Die hier betrachteten Wellen eines ungedämpft schwingenden Oszillators sind charakteristisch für alle Fälle zeitlicher Ausbreitung elektromagnetischer Kräfte. Solche Ausbreitung muß aber immer stattfinden, wenn diese Kräfte irgendwo im Raume Veränderungen erfahren. Sind die Veränderungen langsam, so scheint die Ausbreitung wegen ihrer großen Geschwindigkeit ohne Verspätung stattzufinden; ein bewegter geladener Körper scheint z. B. seine Kraftlinien bis in alle Entfernungen unverändert mit sich zu nehmen. Sind die Veränderungen aber schnell, so kann die Ausbreitung der Kraft als Welle merklich werden, die mit Lichtgeschwindigkeit vom Orte der Veränderung in den Raum hinaus oder auch an Leitern entlang läuft („Wanderwelle"), etwa über gleichzeitige langsamere Veränderungen gelagert. Keine irgendwie ruckweise vorsichgehende Elektrizitätsbewegung kann ohne solche Wellen bleiben, und sie sind daher alltägliche Vorgänge bei elektrischem Experimentieren, ganz so wie es alltäglich ist, daß bei unstetiger, stoßender Bewegung von Körpern in Luft Schall entsteht. Ein besonderer Fall der Alltäglichkeit elektrischer Wellen sind die uns stets umgebenden Wellen des Ultrarot (W 154), wie auch die sichtbaren Wellen des Lichtes, als Begleitvorgänge der sehr schnellen Wärmebewegungen der elektrizitätttragenden Moleküle und Atome der Körper.

424. Kraftlinien der stehenden freien Wellen. — Bei den bereits betrachteten stehenden freien Wellen (420) fallen stärkste elektrische und magnetische Kraft nicht zusammen, wie bei den fortlaufenden Wellen, sondern sie sind um ¼ Wellenlänge gegeneinander verschoben, ganz wie bei den stehenden Drahtwellen (413). Es sind dabei sowohl die elektrischen als auch die magnetischen Kraftlinien je innerhalb einer halben Wellenlänge in sich geschlossen und die Ringe der beiden Kraftlinienarten umschließen einander wie die Glieder einer Kette, abwechselnd elektrisch und magnetisch, senkrecht zueinander gestellt. Es findet fortwährende Verwandlung der beiden Ringarten ineinander statt — im Sinne des elektrodynamischen Zusammenhangs —, so daß zur Zeit stärkster Entwickelung der elektrischen Ringe die magnetischen einen Augenblick verschwunden sind, eine halbe Schwingungsdauer später aber das Umgekehrte stattgat. Es ist dies derselbe Vorgang, den wir schon bei den stehenden Drahtwellen fanden (416), nur hier mit etwas veränderten Formen der Kraftlinien.

425. Strahlen elektrischer Kraft. — Daß die elektrischen Wellen nicht nur mit Lichtgeschwindigkeit laufen und transversal sind, sondern daß sie alle Eigenschaften der Lichtwellen haben, die nicht an deren bestimmte kleine Längen gebunden sind, daß sie wirkliches, nur unsichtbares Licht sind, dies war am besten nachweisbar durch Herstellung paralleler Strahlenbündel dieser Wellen.

Die Möglichkeit dazu war durch die gute Reflexion an Metallblechen gegeben; es war nur der Oszillator in die Brennlinie eines paraboloisch-zylindrischen Hohlspiegels zu stellen (vgl. O 31). Der Spiegel muß freilich ziemlich groß sein gegenüber der Wellenlänge, da sonst nur Beugungserscheinungen zu erwarten wären (O 144); auf besondere Glätte der Spiegelfläche kommt es dagegen, eben wegen der ansehnlichen Länge der Wellen, ebensowenig an wie bei Schallwellen (A 36).

Um die Versuche in kleinem Maßstab erstmals ausführen zu können, mußten die Wellen des Oszillators, also auch seine Schwingungsdauer verkürzt werden,

was durch Verkleinerung von Kapazität und Selbstinduktion erreicht wird (397). Dies macht den ganzen Oszillator entsprechend klein. Mit der kleinen Kapazität faßt er aber wenig Elektrizitätsmenge, also auch wenig Energie, die immer durch Menge mal Spannung gegeben ist, wenn nicht die Spannung erhöht wird. Letzteres erreicht man durch Ausfüllung der Funkenstrecke mit Öl, dessen große Durchschlagsfestigkeit (116) den auslösenden Funken erst bei sehr hoher Spannung kommen läßt. Abb. 92 zeigt einen solchen Oszillator mit Ölumgebung (Öl schraffiert) für Wellen von einigen Dezimetern Länge. Die Ladung wird ihm durch Nebenkugeln in kleinen Funken zugeführt, um die Kapazität der Zuleitung auszuschalten.

Zum Nachweis der Wellen am empfangenden Resonator, der ebenfalls in einen Hohlspiegel gestellt wird, kann man sich statt der Funken des Fritters („Kohärers") bedienen, bei dem die Funkenstrecke durch eine mit Metallstücken oder Feilicht gefüllte Glasröhre ersetzt ist (vgl. Abb. 93). Die Metallstücke geben wegen der Oxyd- oder Fettschichten an ihren Oberflächen keine gute

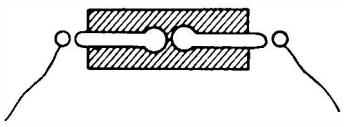


Abb. 92. Kleiner Oszillator für sehr kurze Wellen.

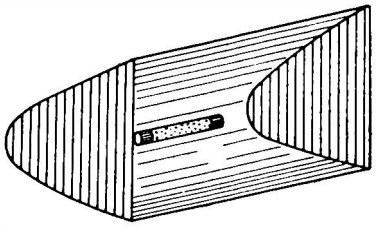


Abb. 93. Hohlspiegel mit Fritter in der Brennlinie.

Elektrizitätsleitung, so daß ein an den Fritter geschaltetes Galvanometer mit Stromquelle keinen Ausschlag gibt. Kommt aber in der Richtung des Resonators mit seiner Periode schwingende elektrische Kraft an ihn heran, so durchbrechen kleine Entladungen die trennenden Schichten und die Metallstücke fritten zusammen, worauf Ausschlag des Galvanometers erfolgt, der somit die Ankunft einer Welle anzeigt. Beklopfen des Fritters zerstört seine leitenden Verbindungen und macht ihn so zu neuem Wellennachweis bereit. Statt des Galvanometers kann auch eine elektrische Klingel oder ein Telegraphenapparat an den Fritter geschaltet werden[1]).

Zwei gleiche Hohlspiegel, im einen der Oszillator, im andern der Resonator, im Abstand mehrerer Meter einander zugewendet aufgestellt, können zu Versuchen mit den seitlich begrenzten Strahlen elektrischer Kraft dienen, welche solche Spiegel geben. Der Strahlengang ist dabei gleich dem in Abb. 71, W 151, Bd. II. Die Zuleitungen für den Oszillator sowie den Resonator werden, um nicht zu stören, durch Löcher am Scheitel der Spiegelwand zu den hinter den Spiegeln befindlichen zugehörigen Vorrichtungen geführt.

Daß der Spiegel ein gut zusammenbleibendes paralleles Wellenstrahlbündel liefert, davon überzeugt man sich durch fast ungeschwächte Wirkung

[1]) Dies waren die ersten Hilfsmittel drahtloser Telegraphie. Die neueren, weit empfindlicheren Nachweismittel elektrischer Wellen, beruhend auf Verstärkung der ankommenden Kräfte mittels Elektronen, erwähnen wir später (477).

auf große Entfernungen und auch durch Zuhilfenahme seitlich aufgestellter Metallschirme oder durch Blechwände mit Öffnungen gleich der Spiegelöffnung, „Blenden" wie in der Optik, die die Wirkung nicht hindern.

Man kann mit einem solchen Strahlenbündel elektrischer Kraft Versuche anstellen, die denen der Optik mit Licht gleich sind.

426. Vor allem ist leicht die Durchlässigkeit oder Undurchlässigkeit von Schirmen untersuchbar, die man in den Strahl stellt. Metalle, auch in sehr dünnen Schichten, sind undurchlässig; Glas, aber auch Pappe und Holz sind durchlässig. Überhaupt zeigen sich alle guten Elektrizitätsleiter undurchlässig, alle Isolatoren durchlässig, was zu erwarten ist, da die elektrischen Kraftlinien der Wellen in Leitern nicht bestehen bleiben, sondern Elektrizitätsbewegung hervorrufen. Daß Holz für so schnell wechselnde Kräfte als Nichtleiter wirkt, weshalb es durchlässig ist, dies wurde bereits vermerkt und begründet (401). Die Undurchlässigkeit der Leiter ist übrigens dasselbe, wie die schon betrachtete elektrodynamische Schirmwirkung (384), insofern sie auch auf Strömen im Schirm beruht. Diese Ströme laufen hier wegen der sehr hohen Wechselzahlen in besonders dünner Oberflächenschicht (385), was die völlige Undurchlässigkeit auch dünnster Metallbleche erklärt.

Die Undurchlässigkeit metallischer Schirme beruht aber nur zum kleinsten Teile auf Absorption der Energie — Stromwärme — im Metall, sondern in der Hauptsache auf der bereits betrachteten starken Reflexion der Wellen (418). Man kann die Menge der reflektierten und der bleibend eindringenden Energie für Leiter und auch für Nichtleiter nach Maxwells Gleichungen berechnen, wenn man das an Grenzflächen geltende Verhalten der Kräfte berücksichtigt, das wir in der Hauptsache bereits früher betrachtet haben (111). Die für die Optik bedeutungsvollen Ergebnisse für Nichtleiter, d. i. für durchsichtige Körper, haben wir bereits dort eingehend behandelt (O 176), ebenso auch die Ergebnisse für den Fall resonanzfähiger Teile im Körper (419, O 88).

Daß die Undurchlässigkeit der Metalle auf den in ihnen entstehenden Strömen beruht, dies zeigt sich am unmittelbarsten, wenn man Schirme benutzt, die nur in einer Richtung leiten, wie es Gitter aus parallelen Drähten oder Holzplatten mit darauf geklebten parallelen Stanniolstreifen sind. Stellt man einen solchen Schirm mit der Richtung seiner Drähte oder Streifen parallel zur Schwingungsrichtung des Ozillators, also auch parallel zur elektrischen Kraft im Strahl auf, so zeigt er sich undurchlässig. Dreht man ihn aber in seiner Ebene um 90^0, so daß die Richtung seiner Leitfähigkeit senkrecht zur elektrischen Schwingung steht, so ist er durchlässig.

427. Letzterer Versuch führt es auch vor Augen, daß der Strahl des Ozillatorspiegels polarisiert ist im Sinne der Optik (O 166); er ist einseitig, und dies ist hier auch selbstverständlich, weil die elektrische Schwingung nur in einer einzigen Ebene senkrecht zum Strahl vor sich geht und weil die in der anderen Ebene liegende magnetische Schwingung von anderer Art ist, z. B. mit elektrischer Leitfähigkeit nichts zu tun hat.

Der einseitig leitende Schirm (426) verhält sich in der Tat gleich dem Turmalin der Optik (O 186); er läßt nur eine (elektrische) Schwingungsrichtung durch und wirkt so als Analysator.

Noch ein anderer einfacher Versuch zeigt solche optische Analogie: Empfängerspiegel und strahlerzeugender Spiegel müssen parallel gerichtet sein, z. B. beide aufrecht stehen, wenn Empfängerwirkung eintreten soll. Legt man den Empfän-

gerspiegel horizontal, wie in Abb. 93, bei aufrechtstehendem Strahlgeber, so tritt keine Wirkung am Fritter ein, weil er dann nur in Querrichtung leitend werden kann, was keinen Strom in Längsrichtung und daher auch keinen Galvanometerausschlag oder kein Klingelzeichen auslösen kann. Man hat dann das Analogon zu den gekreuzten Spiegeln oder Spaten der Optik.

428. Reflexionsversuche mit Metallblechen als Spiegeln sind auch leicht ausführbar, und man kann dabei auch das für Licht geltende Winkelgesetz der Reflexion bestätigen (vgl. 418).

429. Brechung des elektrischen Strahles kann mit Prismen untersucht werden, deren Abmessungen nur immer groß gegen die Wellenlänge sein müssen, wie die der Spiegel; sonst könnten sie nur Beugungserscheinungen geben (O 144). Leicht herstellbar ist ein Prisma aus Pech oder Paraffin, das genügend isoliert, um sehr durchlässig zu sein, und das man in ein Hohlprisma aus Holz gießen kann, dessen planparallele Wände nicht stören können (O 44). Sucht man den Raum hinter dem vom Strahl getroffenen Prisma, bei Abblendung etwa seitlich neben dem Prisma vorbeigehenden Strahlen, mit dem Resonatorspiegel ab, so findet man den Strahl aus seiner geradlinigen Fortsetzung durch das Prisma abgelenkt und zwar nach dessen stumpfer Seite hin, wie man es für Licht gewohnt ist. Man kann ein Minimum der Ablenkung aufsuchen, Ablenkungs- und Prismenwinkel messen und danach den Brechungsexponenten des Stoffes des Prismas berechnen (O 44). Da der Brechungsexponent das Verhältnis der Strahlgeschwindigkeiten außer- und innerhalb des Stoffes angibt (O 41), und da dies Verhältnis nach Maxwells Gleichungen $c:c/\sqrt{\varepsilon\mu} = \sqrt{\varepsilon\mu}$ ist (421), muß der Brechungsexponent $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ erwartet werden, oder für nicht stark eisenhaltige Stoffe, für welche $\mu = 1$ ist, $n = \sqrt{\varepsilon}$: der Brechungsexponent gleich der Wurzel aus der Dielektrizitätskonstante des Stoffes. Man findet dies bestätigt, was wieder ein besonders auffallendes Beispiel der Geltung von Maxwells Gleichungen ist.

Daß für kürzere Wellen, für deren Takt mitschwingende Teile im Medium sich finden, die Wirkung dieses Mitschwingens berücksichtigt werden muß (vgl. 419), was ebenfalls nach Maxwells Gleichungen geschehen kann, dies ist samt den Ergebnissen bereits in der Optik eingehend beachtet worden (O 88). Je länger die Wellen sind, desto weniger können die in allen Körpern enthaltenen kleinen Resonatoren von Atom-Größenordnung mitschwingen, desto mehr nähert sich der Brechungsexponent bei allen Körpern der Wurzel aus der Dielektrizitätskonstante; es kommen dann nur mehr die durch diese Konstante bemessenen dielektrischen Verschiebungen zur Wirkung. In der Tat gilt oft sogar schon für nicht zu kurzwelliges sichtbares Licht oder doch für Ultrarot die Beziehung $n = \sqrt{\varepsilon}$.

430. Die Wellen des Lichtes sind elektromagnetische Wellen. — Alle diese Beobachtungen (425—429) lassen die Wellen des elektrischen Oszillators gleich Lichtwellen erscheinen, denen nur die Sichtbarkeit fehlt, weil sie von zu großer Länge sind; sie haben alle wesentlichen Eigenschaften der Lichtwellen, und umgekehrt ist kein Zweifel, daß die mit gleicher Geschwindigkeit laufenden und ebenfalls transversalen Wellen (O 167) des sichtbaren, ultravioletten und ultraroten Lichtes auch elektromagnetische Wellen sind. Damit

ist diese schon seit W. Weber nahegerückte Kenntnis (vgl. 300) vollständig geworden. Wir haben diese Erkenntnis in der Optik auch schon vorangestellt (O 3) und mit allen Erscheinungen des Lichtes verglichen, wobei überall vollkommene Übereinstimmung mit aller sonstigen Kenntnis, besonders auch mit der Kenntnis vom elektrischen Aufbau der Atome, die lichtaussendend und -absorbierend wirken, sich zeigte (O 74 u. f.).

Daß die Atome als Oszillatoren und Resonatoren wirken, haben wir auch bereits aus optischen Beobachtungen erkannt (O 79, 88, 90), schließend aus der ebenfalls aus rein optischen Beobachtungen festgestellten Wellennatur des Lichtes (O 120 u. f.), und es ging sogar auch die elektrische Natur der Resonanz der lichtabsorbierenden Atome bei den Phosphoren aus rein optischen Beobachtungen hervor; es war die für elektrische Oszillatoren und Resonatoren geltende Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Dielektrizitätskonstante der Umgebung (397) quantitativ nachweisbar (O 113).

Wir kommen damit auf die schon in der Optik gegebene Darstellung der Lichtwelle (O Abb. 1, Bd. III) zurück, die hier im unteren Teil der Abb. 94

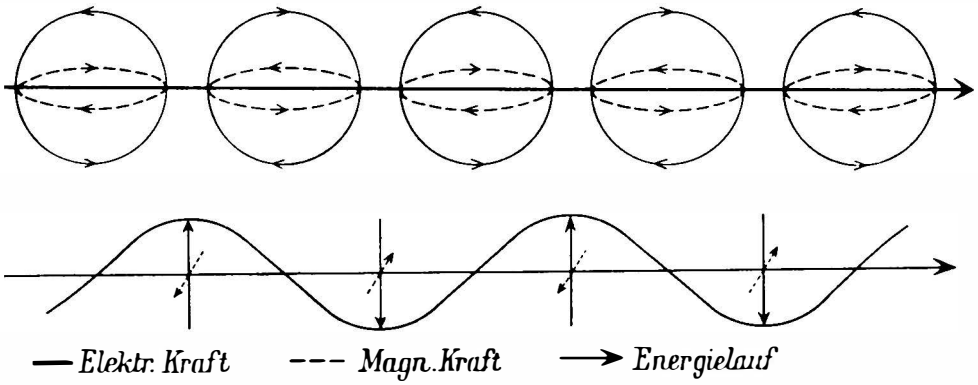


Abb. 94. Lichtstrahl, schematisch.

nochmals enthalten ist mit darüber gestelltem schematischen Kraftlinienbild. Man sieht, perspektivisch gezeichnet, die zueinander senkrechten Ringe der elektrischen und der magnetischen Kraft. Es ist für je ein Bündel der elektrischen Kraftlinienringe aus Abb. 91 nur ein einzelner Ring, und zwar schematisch von Kreisform gezeichnet; je zwei benachbarte Ringe geben zusammen, mit gleicher Kraftrichtung aneinander grenzend, je eine Maximalstelle der Kraft, einen Berg oder ein Tal der im unteren Teil der Abbildung gezeichneten Welle. Die magnetischen Ringe sind hier beim Strahl, im Unterschied zur seitlich nicht begrenzten Welle der Abb. 91, in je einer halben Wellenlänge kurz geschlossen, wie es auch beim langwelligen Strahlenbündel des Hohlspiegels (425) zu denken ist. Die Breite der Kraftlinienringe, quer zum Strahl gemessen, muß in Wirklichkeit stets ein großes Vielfaches der halben Wellenlänge sein; Strahlen von solcher Schmäle wie in der schematischen Abb. 94 gibt es nicht (O 144); es würde ein solcher Strahl, durch eine entsprechend enge Öffnung ausgesondert, sogleich in die Breite sich entwickeln, wie es die Kraftlinienringe der Abb. 91 zeigen.

Über nachgewiesene Breiten von Wellenfronten in sichtbarem Licht haben wir in der Optik berichtet (O 161).

Die schon öfter benutzte Abb. 95, welche sämtliche elektromagnetischen Wellen aller Längen zusammenstellt[1]), zeigt den geringen Umfang des sichtbaren Teiles dieser Wellen. Als „elektrische Wellen" sind die mit elektrischen Mitteln erzeugten Wellen bezeichnet. Ihre Länge ist nach oben unbegrenzt, wie aus der Gleichung der Schwingungsdauer zu sehen (397); nach unten gibt die Schwierigkeit, kleinste Oszillatoren mit einiger Energie zu versehen, eine Grenze. Dies ist durch die (schon ausgefüllte) Lücke (bei 1 mm Wellenlänge) zwischen dem von

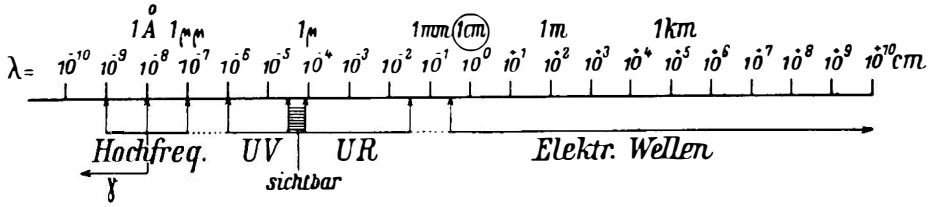


Abb. 95. Ätherwellenskale nach Großoktaven.

warmen Körpern erhältlichen Ultrarot (W 156) und den elektrischen Wellen angedeutet (vgl. W 179).

431. Vervollständigung optischer Kenntnisse. — Manche Fragen der Optik waren durch Beobachtung am Licht nicht eindeutig entscheidbar; die Wellen des Lichtes sind so klein, daß Einzelheiten an ihnen nicht leicht wahrnehmbar werden. An den elektrischen Wellen hat man Lichtwellen von solcher Vergrößerung, daß deren Inneres durch Hineingreifen mit den Händen im einzelnen untersuchbar wird. Dies hat die Entscheidung mancher Fragen der Optik geliefert.

Unmittelbar geklärt hat sich die Frage nach der Schwingungsrichtung des polarisierten Lichtes (O 169) durch die Einsicht, daß die Schwingungen in beiden aufeinander und zum Strahl senkrechten Ebenen stattfinden, nur mit Kräften verschiedener Art, und daß daher vorerst anzugeben sei, ob man die Ebene der elektrischen oder die der magnetischen Schwingung meint. Man hat sich zur Herbeiführung von Eindeutigkeit dafür entschieden, die Ebene der elektrischen Schwingung kurz „Schwingungsebene des Lichtes" zu nennen. Es entspricht dies einer früh schon gebrauchten, ursprünglich nahezu willkürlichen Annahme über die damals gedachten „Schwingungen des Äthers". Die elektrische Schwingung hat beim Licht aber auch den tatsächlichen Vorzug vor der magnetischen, daß die hauptsächlich zur Wahrnehmung des Lichtes dienenden Wirkungen desselben — die physiologischen und chemischen Wirkungen — nach der Kenntnis vom elektrischen Bau der Atome als elektrische Wirkungen aufgefaßt werden können (O 92). Die Beobachtungen an den langen Wellen haben Trennung der elektrischen und der magnetischen Kräfte in den stehenden Wellen ergeben, die bei Reflexion zustande kommen (420).

So konnte vor allem die Frage entschieden werden, ob die für die Schwingungen des Lichtes in der Optik angenommene Phasenumkehr bei Reflexion

[1]) Entworfen von C. Ramsauer. 1 „Großoktave" umfaßt Wellenlängen im Verhältnis 1:10 im Gegensatz zum Intervall 1:2 der gewöhnlichen Oktave (vgl. W 156).

am dichteren Medium (O 126) tatsächlich die elektrische Kraft — nicht die magnetische — betrifft. Die Versuche zeigten, daß dies der Fall ist. Der Resonator hat bei der Reflexion an Metallspiegeln einen Knoten der elektrischen Kraft an der Spiegeloberfläche gezeigt (420), somit Phasenumkehr der elektrischen — nicht der magnetischen — Kraft, und derselbe Nachweis konnte auch bei Reflexion an einem durchlässigen Medium, einem Paraffinblock, geführt werden; es wurde an der reflektierenden Oberfläche wieder der Knoten der elektrischen Kraft gefunden, ganz wie es dem Vorhandensein elektrisch geladener, mitschwingender Teile im reflektierenden Körper entspricht (419). Die Rückwand des Blockes kann dabei schief stehen, damit Reflexion an ihr nicht mitwirkt[1]). Auch der dem Brechungsexponenten (429) entsprechende Polarisationswinkel (O 172) konnte an einer reflektierenden Paraffinfläche aufgesucht werden, und es zeigte sich, daß die Reflexion nur stattfindet, wenn die elektrische Schwingung parallel der Fläche ankommt.

Alle diese Eigentümlichkeiten elektromagnetischer Wellen stimmen mit Maxwells Gleichungen (406) überein; daß sie ganz der Optik entsprechen, dies zeigt wieder die elektromagnetische Natur der Lichtwellen und im besonderen, daß es die elektrische Amplitude ist, die das Licht sichtbar macht. Mit Recht sind daher Maxwells Gleichungen in diesem Sinne auch auf die Lichtwellen angewandt worden, und der gute Erfolg in verwickelten Fällen hat es bestätigt (vgl. O 176).

Ein unmittelbarer Nachweis dafür, daß die chemischen (und damit auch die physiologischen) Wirkungen des Lichtes dessen elektrischen Kräften zugehören, ist durch Untersuchung stehender Lichtwellen geliefert, die an reflektierenden Silberflächen entstehen. Ihre Bäuche und Knoten konnten durch eine äußerst dünne, sehr wenig zum Spiegel geneigte photographische Schicht aufgesucht werden. Es zeigte sich, daß die photographische Schwärzung dort auftritt, wo die Bäuche der elektrischen Kraft zu erwarten waren. Dasselbe gilt auch für Fluoreszenz.

432. Technische Anwendungen der elektrischen Wellen. — Diese Anwendungen, die drahtlose oder Wellentelegraphie und Telephonie, „Rundfunk", „Fernsehen" usw. sind sehr bekannt. Grundsätzlich neu gegenüber dem hier bereits Behandelten ist dabei die Erzeugung ungedämpfter, ununterbrochen fortlaufender Wellenzüge und dazu noch die Verstärkung schwacher Schwingungen sowie deren Gleichrichtung und Verwandtes, was alles mittels der im folgenden Abschnitt zu behandelnden Elektronen der Kathodenstrahlen erreicht wird, wie dort anzugeben (477).

Es sei hier nur der Grundgedanke zur drahtlosen Schallübertragung angegeben (Abb. 96). Die zu übertragenden Schallwellen (a in der üblichen Druckdarstellung, siehe A 18) wirken auf das Mikrophon (A 61), verändern durch den wechselnden Druck auf dessen Membran den Widerstand in seinem Leiterkreis und liefern so den Mikrophonstrom (b in der Darstellung wie bei Wechselströmen, 380) mit Intensitätswechseln, die den Druckwechseln in der Schallwelle entsprechen. Dieser Mikrophonstrom wirkt, nach Verstärkung, auf die Amplituden der ungedämpften elektrischen Schwingungen, deren Wellen in die Ferne gehen sollen. Die Periode der elektrischen Schwingungen ist so sehr viel kürzer als die der Schallwellen, daß erstere in den Schwankungen ihrer Amplituden alle Eigentümlichkeiten des Mikrophonstroms und dadurch der zu über-

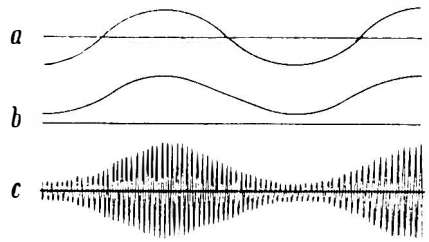


Abb. 96. Wellen der drahtlosen Telephonie (Rundfunk).

[1]) An planparallelen Paraffinplatten konnten auch alle Versuche analog Newtons Ringen durchgeführt werden.

tragenden Schallwellen aufzunehmen vermögen. Dies ergibt die in c dargestellte elektrische Schwingung. Die Schallbewegung ist so der elektrischen Schwingung „aufmoduliert". Dies ist der Grundgedanke, dessen Durchführung mittels der für die ungedämpfte Wellenerzeugung dienlichen Vorrichtungen (477, Abb. 111) ohne grundsätzliche Schwierigkeiten gelang und der die drahtlose Schallübermittelung in große Fernen ermöglicht hat. Diese modulierte Schwingung c wird in gehöriger Intensität an den Ausstrahler („Antenne", „Sender") geleitet, wo sie die entsprechenden, in die Ferne gehenden elektrischen Wellen liefert. Diese Wellen bringen in auffangenden Drähten wieder gleiche Schwingungen (c) hervor, die nur gleichgerichtet zu werden brauchen, so daß alle Elongationen nur nach einer Seite gehen, um — etwa noch verstärkt — einen Strom zu liefern, der dem Mikrophonstrom (b) gleich ist und also in einem gewöhnlichen Telephon oder Lautsprecher (A 103) an der Empfangsstelle die gleichen Schallwellen (a) gibt, die das Mikrophon aufgenommen hat.

Man kann die modulierten Wellen, statt mittels Antenne ins Freie, auch in Kabel leiten, wo sie als Drahtwellen (412) laufen[1]), was sie der öffentlichen Auffangung entzieht. Die dazu dienlichen Kabel müssen innen hohl sein; der Leiterzwischenraum, in welchem die Kraftlinien laufen, muß möglichst nur mit Luft gefüllt sein, was eine besondere Schwierigkeit bei Herstellung solcher Kabel bildet. Feste Isolatoren würden bei dem schnellen Wechsel der Kraftrichtung zu viel Energieverluste durch die dielektrischen Unvollkommenheiten (113, 114) geben. Es können durch ein solches Kabel gleichzeitig 400 verschiedene Schallübertragungen (z. B. Ferngespräche) stattfinden, wenn für jede Übertragung eine andere elektrische Wellenlänge benutzt wird. Die Wellen verschiedener Länge laufen dann sämtlich, übereinandergelagert, an demselben einzigen Leiterpaar des Kabels, ohne einander zu stören; sie werden an der Empfangsseite durch Resonanz voneinander getrennt, indem der auffangende Resonator nur diejenige Welle aufnimmt, auf die er abgestimmt ist (409, 410).

Solche Herausonderung der gewünschten Welle durch Resonanz ist übrigens auch beim drahtlosen Rundfunk im Werk, indem jeder Benutzer aus dem Gewirre der Wellen etwaiger verschiedener Sender nur diejenige herauslöst, auf die er den Resonator seines Empfängers eingestellt hat. Es ist das kein anderer Vorgang als der bei den Lichtwellen in unserem Auge, wo die Resonatoren in den Molekülen der Netzhaut sind (O 53), die nur im sichtbaren Spektrum ansprechen — und zwar auf verschiedene Farben sogar gesondert — und die das viele, uns stets umgebende Ultrarot beiseite lassen.

433. Druck elektromagnetischer Wellen; Strahlungsdruck, Lichtdruck. — Jede einem Strahl elektrischer Kraft entgegengestellte Körpergrenzfläche erfährt einen Druck. Solcher Druck ist durch Messungen nachgewiesen. Um ihn aus den Kraftlinien des Strahls einzusehen, genügt es, eine ebene Welle (421) zu betrachten, welche auf eine ebene Körperoberfläche trifft. Die Kraftlinien beider Arten kommen parallel der Fläche an, und es ist das Querdrängen der an der Fläche zum Stillstand kommenden Kraftlinien, welches den Druck ausübt[2]). Es ist das ein Fall, in welchem die Kraftlinien nur durch ihr seitliches Drängen wirken, nicht wie sonst meist durch ihren Zug. Da aber Drängen und Zug stets einander proportional gefunden wurden (88, 248), kann die Druckwirkung des Drängens im einfachsten Fall gleich der im einzelnen verfolgten Wirkung des Zuges (128) erwartet werden, der Druck also gleich der Energiedichte nächst der getroffenen Fläche (Maxwell 1873)[3]). An einer vollkommen reflektierenden Fläche ist der Strahlungsdruck verdoppelt zu erwarten, im Vergleich mit einer vollkommen absorbierenden Fläche, weil die Energiedichte nächst der Fläche durch die Reflexion verdoppelt ist, indem ankommende und reflektierte Strahlung gleichzeitig im Raume vorhanden sind. In solchen

[1]) S. über die Kabel Anhang E V b 9.

[2]) Während der Bewegung der Kraftlinien mit Lichtgeschwindigkeit fehlt der Druck (415).

[3]) Es ist dies ein Sonderfall des allgemeinen Zusammenhangs von Druck und Energiedichte (s. M 376).

Fällen ist der Strahlungsdruck der Messung zugänglich geworden, wobei er in der Tat so nahe gleich der Energiedichte gefunden wurde, als die Genauigkeit der Messungen ging.

Die Energiedichte $\mathfrak{D}$ einer Strahlung wird leicht berechnet, wenn man die in 1 sek auf 1 cm^2 Auffangefläche fallende Energie $\mathfrak{E}$ kennt, wie dies z. B. beim Sonnenlicht aus der Solarkonstante (W 165) der Fall ist. Es ist $\mathfrak{D} = \mathfrak{E}/c$, weil in 1 sek der Energieinhalt von c cm^3 auf 1 cm^2 Auffangfläche fällt. Hat man $\mathfrak{D}$ in erg/cm^3, so ist das auch der Druck der Strahlung in dyn/cm^2. Danach beträgt der Druck von Sonnenlicht auf eine absorbierende Fläche nach der Solarkonstante nur 0·5 dyn/m^2, d. i. rund ebensoviel Milligrammgewicht auf die große Fläche von 1 m^2. Neben so kleinen Kräften wirken die von Luftströmungen und auch in sehr verdünnter Luft von den Molekülstößen herrührenden Kräfte (Radiometerwirkung, W 159) übermäßig störend; die Messungen mußten daher im vollständigen Vakuum und mit möglichst konzentriertem Licht ausgeführt werden und waren daher schwierig.

So klein der Lichtdruck bei den auf der Erde erreichbaren Strahlungsintensitäten ist; an anderen Stellen, wo größere Intensitäten vorkommen, kann er sehr merklich, ja überwiegend wesentlich werden. Näher zur Sonne muß er entsprechend dem verkehrten Abstandsquadrat vom Sonnenmittelpunkt steigen bis zu 23 Grammgewicht/m^2 an der Sonnenoberfläche. Es kann die Kraft des Strahlungsdruckes sogar die Gravitation überwiegen, wenn die Oberfläche der angezogenen Materie genügend groß ist, d. i. wenn sie genügend fein zerteilt ist; denn Kräfte von Druck sind immer proportional der Oberfläche, von der die Gravitation unabhängig ist. Bei Sonnenlicht überwiegt in dieser Weise der Strahlungsdruck schon bei Partikeln von 0·001 mm Durchmesser, wie sie in grobem Rauch enthalten sind, beim spezifischen Gewicht 1, und dies muß in allen Abständen von der Sonne gelten, weil Strahlungsintensität und Gravitation in gleichem Maß nach dem Entfernungsquadrat abnehmen. Ist die Kraft in größeren Abständen von der Sonne auch gering, so muß sie doch im Vakuum ungestört merklich werden, und es ist wohl nicht zu bezweifeln, daß die von der Sonne stets abgekehrten *Kometenschweife* durch den Druck des Sonnenlichtes weggetriebene Verdichtungsprodukte der aus dem Kometenkern an der Sonnenseite entwickelten Dämpfe sind. Auch aus der eigenen Atmosphäre der Sonne kann Materie in Gestalt genügend kleiner Partikel abgetrieben werden.

Je höher die Temperatur eines Himmelskörpers ist, desto stärker wird der Strahlungsdruck; er muß mit der 4. Potenz der absoluten Temperatur steigen, weil mit dieser die Strahlungsintensität steigt (W 175). Bei Gestirnen von sehr hoher Temperatur muß die Abwanderung von Materie aus der Oberfläche entsprechend stärker sein als bei der Sonne[1]).

[1]) Das früher betrachtete Entweichen von Gasmolekülen infolge der Wärmebewegung (W 89) kann bei höchsten Temperaturen sehr übertroffen werden durch die Abwanderung von Massen infolge des Strahlungsdrucks; denn die Molekularenergie ist nur der ersten, der Strahlungsdruck aber der vierten Temperaturpotenz proportional.

Inwiefern der Strahlungsdruck auch im Inneren heißer Gestirne — der Gravitation entgegenwirkend — wesentlich wird, ist unbekannt, weil gesicherte Kenntnis von den Temperaturen des Inneren fehlt. Der bei den 6000° der Sonnenoberfläche 23 gr/m^2 betragende Strahlungsdruck wird nach der vierten Temperaturpotenz erst bei 230000° 1 Atm., und die Gravitationsdrucke im Inneren großer Gestirne sind sehr hoch (M 305).

Daß der Strahlungsdruck Arbeit leisten kann, ist nicht zu bezweifeln; es liegt darüber eine besondere quantitative Probe vor in einem bewährten Gedankenversuch, der den Lichtdruck in einem Motor arbeiten läßt gleich dem Dampfdruck in der Dampfmaschine (W 257). Die Arbeit wird dabei aus verbrauchter Energie der Strahlung geleistet. Dies ist nach dem Energiegesetz unzweifelhaft, weil andere Energieformen nicht auftreten; es kann aber auch aus den Eigenschaften der Kraftlinien der elektromagnetischen Welle eingesehen werden, ebenso daß Arbeit gegen den Strahlungsdruck die elektromagnetische Energie der Strahlung vermehren muß. Ist nämlich die dem Druck ausgesetzte Grenzfläche des Strahlungsraumes bewegt, so wirken die mitbewegten Kraftlinien der Wellen induzierend, wobei neue Wellen gebildet werden, die je nach der Richtung der Bewegung die vorhandenen verstärken oder schwächen müssen, wie es der Energieregel entspricht (370).

434. Masse der Energie. — Masse haben wir als Maß der Trägheit — dieser Eigenschaft aller Materie — eingeführt (M 57). Trägheitserscheinungen haben wir aber auch an der Elektrizität gefunden in Gestalt der Selbstinduktion (366). Wir sahen auch, daß die Trägheit hierbei nicht der Elektrizität selbst zuzuschreiben ist, sondern ihren Kraftlinien (367), und daß sie gemessen wird durch die Selbstinduktionsgröße L des Leiters, in welchem der Strom in Gang kommen oder wieder zum Stillstand gebracht, allgemein in seiner Stärke geändert werden soll, was stets unter Trägheitserscheinungen erfolgt. Selbstinduktion und Masse haben sich als vollkommen einander analog gezeigt, und diese Analogie hat sich auch weiter bewährt (397). Man kam so dazu, Masse in den Kraftlinien zu suchen, und da diese Linien Energieverteilungen bedeuten (122 u. f., 273 u. f.), konnte der in ihnen enthaltenen Energie die Masse zugeschrieben werden. Wie mit Masse begabt zeigten sich die Kraftlinien außerdem bei der Bildung elektrischer Wellen (421).

Die umfassende Wichtigkeit der Energie bei allen Naturvorgängen mußte die Frage nach einer so wesentlichen Eigenschaft wie Trägheit bei der Energie als höchst bedeutungsvoll erscheinen lassen. Aber jene Vorgänge, die erste Zeichen gegeben hatten, waren nicht einfach genug, um unzweifelhafte Schlüsse aus ihnen zu ziehen, die etwaige Masse aller Energie nachzuweisen und bejahendenfalls eine Berechnung der Größe der Masse gegebener Energiemengen zu ermöglichen. Der elektrische Strom ist ein verwickelter Vorgang, ebenso auch die Entstehung von elektrischen Wellen; es ist vor allem in beiden Fällen die Materie des Leiters oder Oszillators beteiligt, die voll des Unbekannten ist. Hat Energie Masse, so muß dies auch an den freien, fertig gebildeten elektrischen Wellen nachweisbar sein; denn diese enthalten Energie, deren Menge bei Auffangung der Wellen meßbar wird — etwa als Erwärmung im absorbierenden Körper —, und sie enthalten auch die Kraftlinien als Sitz der Energie. In der Tat ist der unzweifelhafte Nachweis von Masse der Energie an den Wellen gelungen, gestützt auf die schon gut gesicherten Kenntnisse vom Lichtdruck (433) und von Dopplers Prinzip (A 88 u. f.).

Ein Gedankenversuch — erlaubter Art (vgl. M 86) — hat, wie schon so oft bei der Naturforschung, hier das Wesentliche geleistet (Hasenöhrl 1904).

Ein parallelepipedischer Hohlraum (Abb. 97) sei von ganz oder nahezu vollkommen spiegelnden Wänden begrenzt und er sei mit Wellenstrahlung erfüllt, die dauernd von Spiegel zu Spiegel hin und her reflektiert wird. Der Zustand kann etwa hervorgebracht sein durch kurzes Erglühenlassen der Wände. Von der Gesamtstrahlung im Hohlraum betrachten wir nur denjenigen Teil, der zwischen den beiden Endflächen a und b in Richtung der Pfeile c

hin und her geht; wir können ihn als allein vorhanden annehmen, da er von gleichzeitig vorhandener andersgerichteter Strahlung nicht gestört wird. Der Zustand des oftmaligen Hin- und Herlaufens der Strahlung im Hohlraum kann in Annäherung für eine genügende Zeit verwirklicht werden, weil es annähernd vollkommen reflektierende Spiegel gibt; der mit dem Hohlraum anzustellende, sehr kurzzeitige Gedankenversuch ist daher erlaubt. Er besteht darin, den ganzen Hohlraum durch Anwendung einer Kraft in beschleunigte Bewegung in Richtung des Pfeiles v zu bringen und Kraft sowie Beschleunigung zu beachten, um daraus auf eine im Hohlraum etwa vorhandene Masse zu schließen. Beschleunigung und Kraft brauchen nicht gemessen zu werden, sondern sie ergeben sich aus den bereits gesicherten Kenntnissen vom Lichtdruck und von Dopplers Prinzip.

Zur Durchführung der zugehörigen Überlegung betrachten wir zuerst den Hohlraum ruhend, was — wie jede weiter noch vorkommende Geschwindigkeit — relativ zur Erde gemeint sei. Die Energiedichte der Strahlung im Hohlraum sei $\mathfrak{D}$, so daß $\mathfrak{D}/2$ in Richtung a b, die andere Hälfte in Richtung b a unterwegs ist. Der Strahlungsdruck ist dann auf beide Spiegel gleich groß, $2(\mathfrak{D}/2) = \mathfrak{D}$; die Spiegel erfahren also bei ihren gleichen Flächen f die gleichen Kräfte $\mathfrak{D} \cdot f$, was am ganzen Hohlraum die Resultierende Null ergibt. Ebenso ist es auch noch, wenn der Hohlraum eine gleichbleibende Geschwindigkeit v hat, die wir klein gegen die Lichtgeschwindigkeit c annehmen. Es wird dann bei der Reflexion an den bewegten Spiegeln a und b jede Wellenlänge λ nach Dopplers Prinzip geändert um den Betrag $2\lambda v/c$ (A 90)[1]. Um denselben Bruchteil $2\,v/c$ muß auch die Energiedichte bei der Reflexion sich ändern, weil alle innerhalb einer Wellenlänge befindliche Energie in derselben bleibt. Die Energiedichte wird — entsprechend der Wellenlängenänderung — an dem in der Bewegungsrichtung vorangehenden Spiegel a verringert um $(\mathfrak{D}/2) \cdot 2v/c = \mathfrak{D}v/c$, am anderen Spiegel b um ebensoviel vergrößert. Eine Änderung der mittleren Energiedichte über den ganzen Hohlraum kann durch die Bewegung nicht eintreten, weil sein Volum und die darin eingeschlossene Energiemenge durch die Bewegung nicht geändert werden[2]; sondern es besteht nur verminderte Energiedichte auf dem Wege von a bis b und vermehrte Energiedichte auf dem Wege von b bis a. Da aber jede der beiden Energiedichten auf dem ganzen Wege vom einen Spiegel bis zum andern gilt, grenzen an beide Spiegel sowohl die vermehrte als auch die verminderte Energiedichte, im ganzen also gleiche Energiedichten, und daher bleiben auch ihre Drucke gleich, wie in Ruhe.

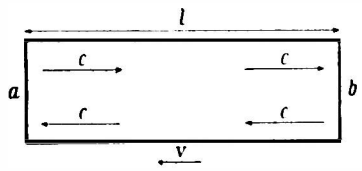


Abb. 97. Hasenöhrls Gedankenversuch.

Anders ist es aber bei beschleunigter Bewegung des Hohlraums; hier entsteht ein Dichtengefälle zwischen den beiden Spiegeln. Denn die an b reflektierte und danach in der Richtung b a laufende Strahlung besitzt in der Nähe von a kleinere Dichte als in der Nähe von b, weil die bei a befindlichen Wellen

[1]) Die Wellenlängenänderung ist in dortiger Bezeichnung $\lambda - \lambda_1 = q/n$, und es ist für den hier vorliegenden Fall $n = c/\lambda$ und $q = 2v$, weil die Geschwindigkeit v des Spiegels die Geschwindigkeit 2v der gespiegelten Quelle gibt.

[2]) Über den nicht der Wirklichkeit entsprechenden Gedanken einer Änderung von Körperabmessungen durch Bewegung s. O 138, Fußnote.

früher, also bei kleinerer Geschwindigkeit des Spiegels b von ihm reflektiert waren. Ebenso erhält auch die in der Richtung a b laufende Strahlung bei a kleinere, bei b größere Dichte. Der Dichtenunterschied $\delta\mathfrak{D}$ muß dem Geschwindigkeitsunterschied δv des Hohlraums entsprechen, welcher zum Zeitunterschied δt gehört, der zur Durchlaufung der Strecke a b = l für das Licht erforderlich ist. Es ist daher $\delta\mathfrak{D} = \mathfrak{D} \cdot \delta v/c$, wobei $\delta v/\delta t = b$ die vorausgesetzte Beschleunigung des Hohlraums und $\delta t = l/c$ ist. Hieraus folgt $\delta\mathfrak{D} = \mathfrak{D} l b/c^2$. Dieser Dichtenunterschied ist auch gleich dem Unterschied der Lichtdrucke an den Spiegeln a und b, wobei nach der vorherigen Überlegung der kleinere Druck an dem in der Bewegungsrichtung vorausgehenden Spiegel a herrscht. Dieser Druckunterschied multipliziert mit der Flächengröße f der Spiegel ergibt die resultierende Kraft $\mathfrak{D} l f b/c^2$, welche in Richtung b a vorhanden sein muß, um die Beschleunigung b aufrecht zu erhalten, und zwar nur infolge des Energieinhaltes des Hohlraums[1]). Da l f das Volum des Hohlraums ist, so ist dieser Energieinhalt $\mathfrak{E} = \mathfrak{D} l f$, und die gefundene Kraft ist also $\mathfrak{E} b/c^2$. Die Kraft dividiert durch die von ihr hervorgebrachte Beschleunigung b ergibt nach Galileis und Newtons Grundgesetz die beschleunigte Masse m des Energieinhaltes $\mathfrak{E}$; wir finden also diese Masse

$$m = \frac{\mathfrak{E}}{c^2} \quad . \qquad 434)$$

Dies ist der richtige, durch den Gedankenversuch ermittelte Zusammenhang zwischen einer Energiemenge $\mathfrak{E}$ und ihrer Masse m, dem Maße ihrer Trägheit. Ist $\mathfrak{E}$ in erg, c in cm/sek bemessen, so ergibt sich m ebenfalls in absoluten CGS-Einheiten, d. i. in gr.

Der Nenner c^2 ist außerordentlich groß, $9 \cdot 10^{20}$ cm^2/sek^2; daher ist die Masse aller gewöhnlichen, der Messung in erg und dem Experimentieren zugänglichen Energiemengen außerordentlich klein, und dies ist auch der Grund, warum Trägheitserscheinungen an bekannten Energiemengen unmittelbar nicht wahrnehmbar geworden sind. So ergibt sich beispielsweise die Masse der chemischen Energie von 1 kgr Kohle mit zugehörigem Sauerstoff, die zu 8000 Kalorien $= 3{\cdot}4 \cdot 10^6$ mkgr $= 3{\cdot}4 \cdot 10^{14}$ erg ermittelt ist, nach Gl. 434 zu nur $4{\cdot}7 \cdot 10^{-4}$ mgr.

Die in den Strahlungen im Himmelsraum vorkommenden Energien sind allerdings so groß, daß auch ihre Massen beträchtlich sind. So strahlt die Sonne nach Maßgabe der Solarkonstante (W 165) in jeder Sekunde $5{\cdot}2 \cdot 10^9$ kgr $= 5{\cdot}2$ Millionen Tonnen Energie in den Raum hinaus, wovon 2 kgr von der Erde aufgefangen werden.

435. Gültigkeit der Masse $\mathfrak{E}/c^2$ für alle Energieformen. — Die Masse von Energie kann nach dem soeben betrachteten Gedankenversuch für die elektromagnetische Energie als festgestellt betrachtet werden, und hierfür ist durch Messungen an schnellsten Kathodenstrahlen auch eine Bestätigung aus besonderer Erfahrung gewonnen worden (481). Es ist aber nach aller Kenntnis unzweifelhaft, daß Gl. 434 nicht nur für elektromagnetische Energie, sondern für alle Energieformen gelten muß. Denn es kommen in der Natur fortwährend Energieumwandlungen großen Maßstabes vor, und wenn dabei, neben der durch das Energiegesetz gegebenen Unveränderlichkeit der Menge der Energie, je nach

[1]) Haben die Wände des Hohlraums Masse, so ist zu deren Beschleunigung noch eine besondere Zusatzkraft notwendig, die uns aber hier nicht beschäftigt.

der Energieform verschiedene Massen aufträten, müßte Neuerscheinen oder Verschwinden von Massen zur Beobachtung kommen, und dies ist nicht erfolgt. Zudem zeigen sich überhaupt alle Energieformen auf elektromagnetische Energie zurückführbar (587).

436. Kräfte und Gegenkräfte an Energiemassen. Wenn Licht auf einen vollkommen absorbierenden Körper fällt, so kommt die nachgewiesene Masse des Lichtes von der Geschwindigkeit $v = c$ auf die Geschwindigkeit $v = 0$, wie bei einem unelastischen Stoß. Der bei einem solchen Stoß ausgeübte Druck ist gegeben durch das Produkt aus der in der Zeiteinheit die Flächeneinheit treffenden Masse M und ihrer Geschwindigkeit v (M 282). Diese Masse ist im Falle des Lichtes Energiemasse. Ist die Energiedichte $\mathfrak{D}$, so ist nach Gl. 434 die Massendichte $\mathfrak{D}/c^2$, wonach $M = (\mathfrak{D}/c^2)c$ (vgl. 433), und also der Druck $Mv = Mc = \mathfrak{D}$, wie es der Wirklichkeit entspricht (433). Man sieht daraus, daß die Energiemasse bei der Anhaltung ihrer Geschwindigkeit ganz wie eine materielle Masse dem Grundgesetz aller Bewegung folgt (vgl. 481).

Trifft Licht auf eine vollkommen reflektierende Fläche, so verhalten sich die Energiemassen wie beim vollkommen elastischen Stoß, bei welchem der Druck verdoppelt sich ergibt (M 282). Dies entspricht auch der verdoppelten Energiedichte am Spiegel, welche verdoppelten Strahlungsdruck bedeutet.

Bei der Lichtaussendung muß die Quelle einen Druck nach rückwärts erleiden von gleicher Größe wie der auf einen absorbierenden Körper ausgeübte Druck. Denn bei der Aussendung werden die Energiemassen von der Ruhe auf Lichtgeschwindigkeit gebracht, und die Gegenkraft zur Kraft, die dies bewirkt, greift an der aussendenden Fläche an.

Steht einer Lichtquelle, von der ein paralleles Strahlenbündel ausgehe, ein dasselbe auffangender absorbierender Körper gegenüber, so werden beide mit den eben betrachteten Drucken einander abstoßen, als wäre hier eine Fernkraft mit der ihr gleichen Gegenkraft tätig (M 209). Aber die elektrischen und magnetischen Kräfte sind keine Fernkräfte (422). So kann die Lichtquelle erloschen oder gar nicht mehr vorhanden sein, und doch wird ihr schon unterwegs befindliches Licht, das bei großem Abstand noch lange den absorbierenden Körper trifft, ohne Zweifel immer noch die Kraft des Lichtdrucks auf ihn ausüben. Dieser Kraft scheint dann die Gegenkraft zu fehlen, wenn man an Fernkräfte denkt. In Wirklichkeit greift die Gegenkraft zum Lichtdruck, der am getroffenen oder am aussendenden Körper wirkt, stets an den Massen der ihm benachbarten, im Raume befindlichen Energien an. Letztere Kraft bringt diese Massen im Falle der Absorption zum Stillstand, im Falle der Aussendung auf Lichtgeschwindigkeit.

Man sieht hier wieder, wie es auch am Beispiel der Kräfte an Stromleitern im Magnetfeld erläutert wurde (320), daß Kräfte immer an Massen angreifen, seien es Massen greifbarer Körper oder die nicht greifbaren Energiemassen der Kraftlinien, und man weiß jetzt, daß auch die letzteren Massen in Grammen angebbar sind.

Bemerkenswert ist im besonderen, daß die wie stoßende Massen gewöhnlicher Körper sich verhaltenden Energiemassen des Lichtes demnach unabhängig von der Geschwindigkeit sich zeigen, die doch beispielsweise bei der Lichtemission sogar von Null bis auf Lichtgeschwindigkeit sich ändert. Wir untersuchen später die Massenänderungen, welche bei so hohen Geschwindigkeiten auftreten können (479 u. f.); es zeigt sich, daß die Masse nur dann sich ändert (steigt), wenn Beschleunigung unter Energiezufuhr stattfindet, und es ist daher zu schließen, daß die Beschleunigung der Energiemassen, d. i. der Kraftlinien der Lichtwellen bei ihrer Aussendung ohne besondere Energiezufuhr erfolgt. Offenbar erfolgt die Ingangsetzung der Welle wie beim großen Oszillator (410, 421) durch das seitliche Drängen der elektrischen Kraftlinien, wobei diese — wie auch sonst (125, 126, 417 u. f.) — die Querbewegung

mit Lichtgeschwindigkeit annehmen, während — damit verbunden — die zugehörigen magnetischen Kraftlinien sich entwickeln (331), deren Energie aber nur aus der schon vorhandenen Energie der elektrischen Kraftlinien stammt (368), so daß die Gesamtenergie und daher auch die Gesamtmasse während der Beschleunigung ungeändert bleibt.

Ist irgendwo im Äther eine Kraftlinienverdichtung entstanden und dann sich selbst überlassen, so wird sie vermöge des Drängens der Kraftlinien sich rings seitlich als Welle ausbreiten. Die Geschwindigkeit der Ausbreitung kann nach der für alle Wellen gültigen Gleichung (A 8, Gl. 8) berechnet werden. „Kraftmaß" in der Gleichung ist die Energiedichte, welche den Druck bestimmt (433), der die Ausbreitung bewirkt; „Massenmaß" ist die Energiemasse der Volumeinheit, welche aber gleich ist der Energiedichte/c^2 (Gl. 434). Die Wurzel aus dem Quotienten Beider ergibt, entsprechend der Gleichung, richtig die Lichtgeschwindigkeit c als Ausbreitungsgeschwindigkeit.

437. Gewicht der Energie. — Wir sahen, daß die Massen der Energie ganz wie Massen greifbarer Körper sich verhalten (436); man kann daher wohl fragen, ob die Energiemassen auch der Gravitation unterworfen sind. Bei der Kleinheit der einer Wägung zugänglichen und in erg bekannten Energiemassen ist dies nicht einfach zu prüfen. Es ist jedoch von zwei Seiten her Erfahrung vorhanden, die die Frage bejaht.

Erstens erleiden Lichtstrahlen, die, von Sternen kommend, an der Sonne vorbeigehen, eine kleine Ablenkung gegen die Sonne hin ungefähr von solcher Größe, wie die Bahn eines mit Lichtgeschwindigkeit bewegten Körpers sie infolge von Gravitation erleiden müßte. Letztere Ablenkung ist aus der bekannten Masse der Sonne, ihrem Radius und der Gravitationskonstante (M 213) leicht berechenbar; sie beträgt wegen der großen Geschwindigkeit des Lichtes trotz der großen Masse der Sonne nur 0·84 Bogensekunden. Beobachtbar wird sie bei Sonnenfinsternissen. Die Beobachtung bedeutet aber keinen reinen Versuch, weil die Sonne von einer in heftigen Bewegungen und fortwährenden Dichteänderungen begriffenen Atmosphäre umgeben ist, welche zur gedachten Ablenkung unberechenbar unregelmäßige Strahlenbrechung hinzufügt. Da die Strahlenbrechung wie durch ein Prisma erfolgt, dessen stumpfe Seite der Sonne zugewendet ist, wirkt sie im selben Sinne wie die gedachte, berechnete Gravitationsablenkung (O 44). Es kann daher die beobachtete Ablenkung nur insofern als Beweisstück für Gravitationswirkung auf das Licht betrachtet werden, als sie die berechnete Ablenkung überschreitet, so daß außer dieser noch ein Betrag für die nicht zu bezweifelnde Strahlenbrechung übrig bleibt, was allerdings der Fall ist.

Eine zweite, rein durchführbaren Versuchen entnommene Erfahrung, in einem Sonderfall, ist unzweifelhaft beweisend für massenproportionale Schwere der Energie. Sie stützt sich auf die Kenntnisse von der Radioaktivität; wir gehen hierauf später ein (582), um dann die Energie und ihre Gravitation von neuem zu betrachten.

Einen Anlaß zu Zweifeln an der Gravitationswirkung aller Energie gibt die Gesamtheit gegenwärtiger Kenntnis nicht. Freilich sind die außerhalb der Materie zu beobachtenden Energiemassen nicht so groß, daß sie auffallende oder auch nur leicht nachweisbare Gravitationswirkung zeigen könnten. Beispielsweise ist eine beobachtbare Verbiegung von Kraftlinien durch ihre Schwere nicht zu erwarten. Die Gewichte der Energiemassen der Kraftlinien sind verschwindend klein neben den die Formung der Kraftlinien bestimmenden Kräften.

III. Anfänge von Weiterem:
Neuere Strahlungen und die Folgen ihrer Kenntnis.

438. Übersicht. — Dieses letzte Kapitel bringt Erkenntnisse, die, obgleich nicht sehr alt, doch gut gesichert, dabei so allgemein wichtig und zu vereinfachtem Verstehen von Vielem unentbehrlich geworden sind, daß wir sie in allen Teilen der Physik schon herangezogen und der Elektrizitätslehre sogar vorangestellt haben (1). Dazu gehört vor allem die Kenntnis des Bestehens und der Eigenschaften der „Elektronen" und die allgemeine Sicherung des elektrischen Aufbaues der Atome der Materie, wozu hier die eingehenden Nachweise zu bringen sind.

Ein großes und wohlgegründetes Kenntnisgebiet bringt auch der Abschnitt über die radioaktiven Umwandlungen der Atome.

Dabei sind viel Ansätze gewonnen zu Erkenntnissen über das Atominnere, die allerdings großenteils noch zu neu sind, um angesichts der Menge des Unbekannten schon als gesichert gelten zu können. Wir bringen sie in Auswahl, als Beispiele versuchsweiser Überschreitung der Grenzen des Bekannten. Andere neuere Kenntnisse, die noch zusammenhanglos dastehen, können wir nur anmerkungsweise berühren. Sie sind zumeist nur im Nachexperimentieren vorher gemachter Rechnungen gewonnen[1]), ohne Bemühung, Anschluß an Bekanntes zu finden und ohne die gründliche, unbefangene Untersuchung, die sie allerdings herausfordern. Solches Wissen kann technisch verwendbar sein; dem einheitlichen Gesamtwissen von der Natur ist es noch nicht eingefügt; es steht als Stückwerk noch daneben.

Einige Vorstellungen allgemeiner Art, zu welchen wir in Zusammenfassung gegenwärtiger Kenntnisse gelangen und die noch Gegenstand weiterer Erwägung sein mögen, bilden den Schluß.

1. Kathodenstrahlen.

Neue Anfänge aus alter Kenntnis.

439. Elektrische Entladung in verdünnten Gasen. — Ihren Anfang nahmen die neuen Errungenschaften beim Studium der elektrischen Entladungen in verdünnten Gasen. Man hatte mit Anwendung der Luftpumpe früh bemerkt,

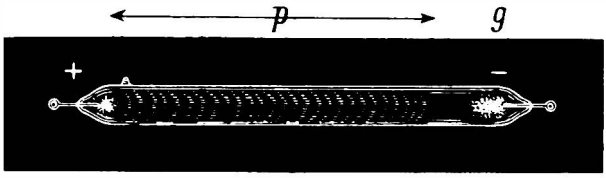


Abb. 98. Positive Säule (geschichtet) und negatives Glimmlicht.

[1]) Vgl. hierzu die Vorworte in Bd. I, S. XII u. XVI.

daß der in Luft von gewöhnlichem Druck dünne elektrische Funke, den wir als Spannungserscheinung bereits betrachteten (26, 27), bei vermindertem Druck breiter wird, zugleich auf fast beliebige Länge kommt und daß bei einigen Millimetern Quecksilberdruck bald das ganze Gefäß mit dem Lichte der Entladung erfüllt wird, wobei Einzelheiten auffallend werden. Diese entwickeln sich bei den seit Einführung der Quecksilberluftpumpe leicht erreichbaren Verdünnungen von etwa 1 mm Quecksilberdruck am besten. Man sieht (Abb. 98), am günstigsten bei Anwendung des Induktoriums als Spannungs- und Stromquelle, die oft aufs regelmäßigste geschichtete „positive Säule" (p), bei Luft rötlich leuchtend, und das blaue „negative Glimmlicht" (g), durch einen dunklen (schon von Faraday bemerkten) Zwischenraum voneinander getrennt. Man bezeichnete die für solche Beobachtungen in die Glaswand luftdicht einzuschmelzenden Stromzu- und -abführungen schon früh mit den von der Elektrolyse her gebräuchlich gewordenen Namen Anode und Kathode, wonach die von der Anode ausgehende positive Säule auch „Anodenlicht" und das die Kathode umgebende Glimmlicht auch „Kathodenlicht" genannt wurde.

Hat das Rohr beliebig gebogene Form, so sieht man die positive Säule über alle Krümmungen des gegebenen Leitungsweges sich erstrecken, wie es der Strom auch in festen und flüssigen Leitern beliebiger Form tut. Ist der Rohrquerschnitt genügend groß, so zeigt sich im Magnetfeld, daß die positive Säule dieselben Querablenkungen oder auch dauernden Querbewegungen ausführt wie der Strom in festen oder flüssigen Leitern (z. B. auch wie in Abb. 50; s. 314 u. f.).

Es ist hieraus und aus den großen Längen, die die positive Säule annehmen kann, ersichtlich, daß das verdünnte Gas ein verhältnismäßig guter Leiter wird, sobald nur die an die Elektroden gelegte Spannung in genügender, mäßiger Höhe auf dasselbe gewirkt hat. Die Wärmeentwicklung ist dabei sehr gering, was nach dem Stromwärmegesetz bei den sehr geringen Stromstärken und geringen Spannungen auch nicht anders zu erwarten ist.

Die Möglichkeit, beliebige Gase in geeigneter Verdünnung in solchen Entladungsröhren zum Leuchten zu bringen, wurde viel benützt, um die den Gasen zugehörigen Spektrallinien kennen zu lernen (O 76). Die Einzelheiten der Erscheinungen in diesen Röhren blieben aber ganz außerhalb des irgendwie Begreifbaren.

440. Kathodenstrahlen. — Man kam den unverständlichen Erscheinungen näher, als die Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Teil derselben hingelenkt war, der besonders einfache Eigenschaften zeigte. Es war das das negative Glimmlicht im Falle sehr hoher Gasverdünnungen. Es zeigte sich, daß dieses Glimmlicht aus geradlinig von der Kathode ausgehenden Strahlen besteht (Hittorf 1869). Wird der Gasinhalt einer Entladungsröhre fortschreitend mehr verdünnt, so entwickeln sich diese Strahlen — „Kathodenstrahlen" benannt — fortschreitend besser, während die positive Säule verblaßt und bald ganz verschwindet. Die zum Zustandekommen der Entladung erforderliche Spannung steigt dabei wieder; zuletzt, bei vollständiger Luftleere in der Röhre, geht keine Entladung mehr durch, und es entstehen auch keine Kathodenstrahlen mehr; die Röhre bleibt dunkel. Bei der zu bester Entwickelung der Kathodenstrahlen geeigneten Verdünnung ist das Glimmlicht an der Kathode verschwunden;

es hat sich ganz in die an sich unsichtbare Strahlung verwandelt, die dann bis zur Glaswand reicht und dieselbe dort, wo sie auftrifft, zu heller Fluoreszenz bringt, wie es ultraviolettes Licht tun würde, bei gewöhnlichem Glas mit grüner Farbe. Daran allein ist dann das Vorhandensein und der Verlauf der Kathodenstrahlen erkennbar. Wie die Glaswand leuchten auch andere fluoreszenz- oder phosphoreszenzfähige Körper in der Röhre, wenn sie von den Strahlen getroffen werden, jeder in der ihm eigenen Farbe.

Die wesentliche, einfache Eigenschaft dieser Strahlen, ihre Geradlinigkeit, wird mit Hilfe schattenwerfender Körper, die zwischen Kathode und Glaswand in der Röhre anzubringen sind, ersichtlich. Abb. 99 zeigt bei d den Schatten eines in der Röhre befindlichen Blechkreuzes b, entworfen von den Strahlen der scheibenförmigen Kathode a.

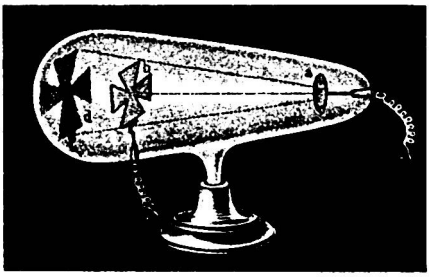


Abb. 99. Geradlinigkeit der Kathodenstrahlen.

Man findet durch solche Beobachtungen, daß die Strahlen nahe senkrecht zur Kathodenoberfläche gerichtet von ihr oder ihrer Umgebung ausgehen. Die Lage der Anode ist dabei gleichgültig; so kann in Abb. 99 ebensogut das Kreuz als Anode dienen wie etwa eine an anderer Stelle angebrachte Elektrode.

441. Unabhängigkeit der Strahlen. — Das V-förmige Rohr in den Abb. 100 ist besonders geeignet, die Unabhängigkeit dieser Strahlen von der Röhrenform, sowie von der Lage der Anode und damit auch vom Wege des sie erzeugenden Entladungsstromes zu zeigen. Alle drei Elektroden dieser Röhre sind ebene, quer zu einem der beiden Rohrschenkel stehende Platten; die Strahlen gehen daher jedesmal von der zur Kathode gemachten Platte in

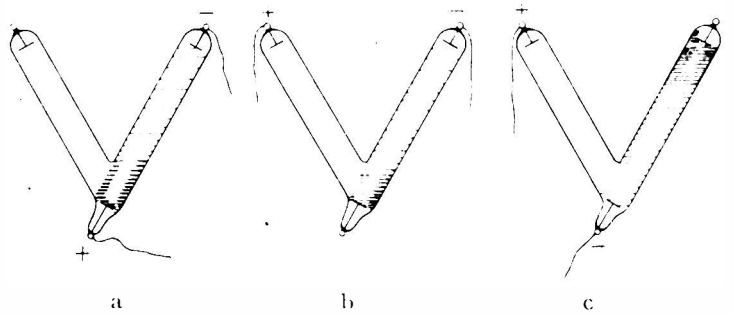


Abb. 100 a, b, c. Kathodenstrahlen gehen senkrecht von der Kathode aus, unbekümmert um die Lage der Anode und den Verlauf der sie erzeugenden Entladung.

Längsrichtung des betreffenden Rohrschenkels aus und erleuchten denselben streifend, wie es die Abbildungen durch Schraffierung darstellen. In Abb. 100a ist nur der rechte Schenkel des Rohres benutzt; die Kathodenstrahlen gehen in diesem Falle auf die Anode zu; in den anderen Schenkel biegen sie nicht um. In Abb. 100b ist die Kathode dieselbe geblieben, die Anode aber in den anderen

Schenkel verlegt; man sieht, daß dies am Laufe der Strahlen gar nichts ändert; sie biegen wieder nicht in den anderen Schenkel um, obgleich dieser jetzt zum Entladungsweg gehört. In Abb. 100c ist endlich der Weg der Strahlung gänzlich abgesondert vom Entladungsweg; die Strahlung verläuft im rechten, die sie erzeugende Entladung im linken Schenkel.

Die Strahlen können große Energie haben, was an Wärmewirkung ersichtlich wird. Ist die Kathode hohlkugelig, so sammeln sich die Strahlen, wieder senkrecht von der Kathodenoberfläche ausgehend, im Krümmungsmittelpunkt und bringen ein dort befindliches, nicht zu dickes Metallblech leicht zum Glühen.

Sehr wesentlich, weil unterscheidend von allen älter bekannten Strahlungen, auch von ultraviolettem Licht, erschien sogleich die Eigenschaft der Kathodenstrahlen, im Magnetfeld gekrümmt zu werden. Man bemerkt sehr leicht die Krümmung bei Annäherung eines Magneten an das Entladungsrohr; die Schattenbilder werden verschoben. Die Strahlen werden quer zu den Kraftlinien des Magnetfeldes abgelenkt, wie ein elektrischer Strom (316), jedoch in solchem Sinne, daß positiver Strom in den Strahlen zur Kathode hinfließen müßte oder auch: wie von der Kathode weg bewegte negativ elektrische Massen.

Alle diese Beobachtungen hatten genügen müssen, um zu zeigen, daß in diesen Kathodenstrahlen eine besondere, höchst eigentümliche Strahlungsform von sehr einfachem, doch gründliche Untersuchung erst noch herausforderndem Verhalten vorliege (Crookes 1879).

442. Reine Versuche mit Kathodenstrahlen. — Die gründliche Untersuchung war lange verzögert. Sie war nicht nur erschwert durch den Umstand, daß alles im notwendigerweise ganz luftdichten, für jeden Versuch immer erst neu herzustellenden und auszupumpenden Entladungsrohr vor sich gehen mußte, sondern sie war auf bisherigem Wege unmöglich, weil man im Entladungsrohr keine reinen Versuche anstellen konnte[1]). Denn jede Änderung im Strahlenweg zur Feststellung der Eigenschaften der Strahlen bedeutete auch Änderung der Erzeugungsbedingungen und damit Änderung der Eigenschaften der Strahlen. Es hatte sich nämlich gezeigt,daß je nach der Gasverdünnung und der Gestaltung der Umgebung der Kathode nicht nur die Intensität, sondern auch die Art der erzeugten Kathodenstrahlen verschieden ausfällt, letzteres erkennbar an dem verschiedenen Grad ihrer magnetischen Ablenkbarkeit.

Man durfte aber nach Erfahrungen, wie an dem Rohre der Abb. 100 annehmen, daß die Strahlen auch ganz abgesondert von der sie erzeugenden Entladung, vielleicht also auch außerhalb des Entladungsrohres zu bestehen und ihren Weg fortzusetzen vermöchten, was sogleich reine Versuche und damit sicheren Fortschritt ermöglichen würde. Es war dazu ein für die Kathodenstrahlen durchlässiger Verschluß in der Wand des Entladungsrohres anzubringen. Abb. 101 zeigt die Einrichtung, welche dies verwirklicht, in einem Schnitt durch das von der Kathode K ausgehende Strahlenbündel. Dasselbe trifft auf das „Fenster", ein sehr dünnes Aluminiumblatt, welches über eine kleine Öffnung der starken Metallkapsel m m gekittet ist und wie diese sowohl dicht ist als auch den Luftdruck aushält. A ist die Anode. Ein Metallschirm S S und das Gehäuse G G

[1]) Die große Wichtigkeit reiner Versuche haben wir schon bei vielen Gelegenheiten bemerkt und hervorgehoben, zuerst bei Galileis Untersuchungen über die Fallbewegung (M 119; vgl. auch Einl. 6, Bd. I).

schützen den Raum außerhalb des Fensters, den „Beobachtungsraum", vor den elektrischen Kräften der Entladung (vgl. 43, 384, 426), wozu alle diese Metallteile samt dem Fenster leitende Verbindung mit der Erde haben. Das mit den Elektroden der Röhre verbundene Induktorium hat parallel zur Röhre eine Funkenstrecke zwischen Kugeln in freier Luft, um die benutzte Spannung zu bemessen (34). Bei etwa 30000 Volt Spannung (nahezu 3 cm Funkenlänge), die im folgenden vorausgesetzt sei, treten intensive, phosphoreszenzerregende Strahlen aus dem Fenster in den Beobachtungsraum. Die Strahlen sind also in der Tat von der erzeugenden Gasentladung unabhängige Vorgänge, und sie können, obgleich nur in sehr verdünnten Gasen erzeugbar, doch Strecken von 5 bis 10 cm in freier Luft zurücklegen. Letzteres war nicht vorauszusehen, eröffnete aber sogleich weitgehende Untersuchungsmöglichkeiten. Jeder phosphoreszenzfähige Körper ist geeignet, den Verlauf der Strahlung im Be-

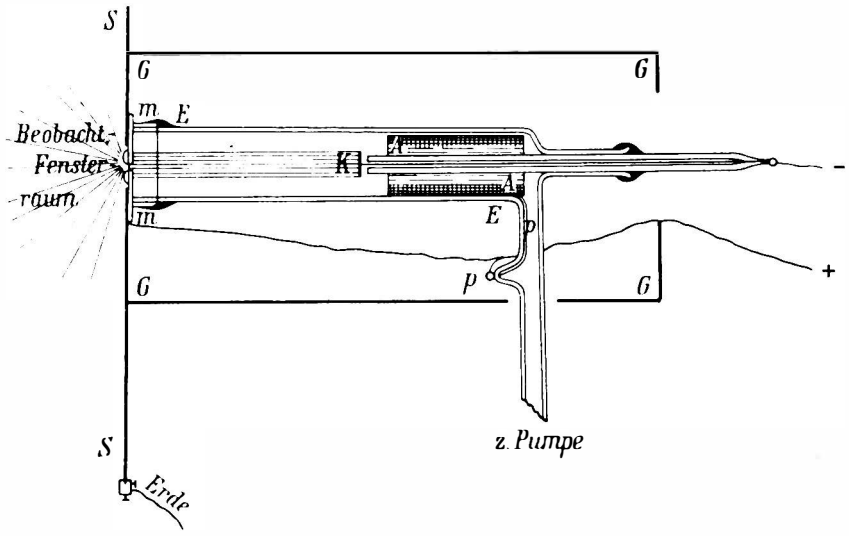


Abb. 101. Kathodenstrahlen zu reinen Versuchen abgesondert von der erzeugenden Entladung.

obachtungsraum anzuzeigen; man findet dicht beim Fenster äußerst helle Phosphoreszenzen, die in größeren Abständen schwächer werden bis zum Verschwinden.

Zum Festhalten von Beobachtungen kann auch die photographische Schicht benutzt werden; denn auf diese wirken die Strahlen gleich ultraviolettem Licht. Die Strahlen machen sich auch durch starke Ozonerzeugung in der Luft merklich.

Versuche in einem an die Fensterwand gedichteten Raum, in welchem man die Luft beliebig verdünnen kann, zeigen, daß die aus dem Fenster kommenden Strahlen dann auf sehr lange Strecken sich ausbreiten und daß sie die im Inneren der Entladungsröhren schon beobachteten Eigenschaften, besonders auch die magnetische Ablenkbarkeit besitzen. Diese und viele sonstige, im Entladungsrohr nur unsicher oder gar nicht auffindbare Eigenschaften der Strahlen wurden nun

in reinen Versuchen zweifellos und quantitativ feststellbar, indem man die Strahlen bei völlig unveränderter Erzeugungsweise unter beliebig abgeänderten Umständen, in beliebigen Medien untersuchen konnte (1894).

Die Fülle der nun von selbst sich ergebenden neuen Beobachtungen, allein schon in freier Luft, war so groß, daß alsbald mehrere Forscher auf die hier eröffneten Wege ins Unbekannte aufmerksam wurden und den vorher durch mehr als zwei Jahrzehnte meist erfolglos bearbeiteten Kathodenstrahlen ihre Aufmerksamkeit zuwandten, woraus in verhältnismäßig sehr kurzer Zeit (wie gelegentlich einzuschaltende Jahreszahlen zeigen werden) die heute umfassende Kenntnis auch anderer Strahlungen und ein Anfang zu eingehender Erforschung des Atominneren sich entwickelte. Vor allem wurde auch die so lange unbekannt gebliebene Natur der Kathodenstrahlen selbst ergründbar. Teilweise hat man dabei allerdings den Gedanken an reine Versuche wieder ganz verlassen; die in den reinen Versuchen gewonnenen festen Anhaltspunkte erleichterten schnelles Vorgehen. Beweisend, gesicherten Fortschritt verbürgend können unreine Versuche freilich nicht sein, weshalb wir uns an diese hier nicht halten können.

Wir können diese schnelle und ergiebige Entwickelung nicht genau in zeitlicher Reihenfolge darstellen; sondern es kommt vor allem auf Zusammenfassung der grundlegenden Ergebnisse und auf die Darlegung von deren Sicherung an.

443. Diffusion (Streuung) der Kathodenstrahlen in der Materie. — Die Strahlen kommen aus dem Aluminiumfenster (442) nicht als paralleles

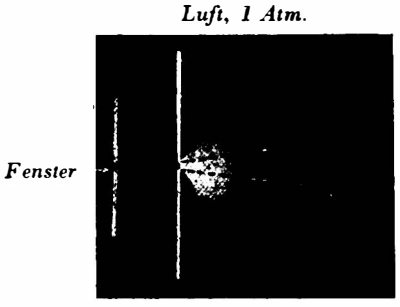


Abb. 102. Diffuse Ausbreitung der Kathodenstrahlen.

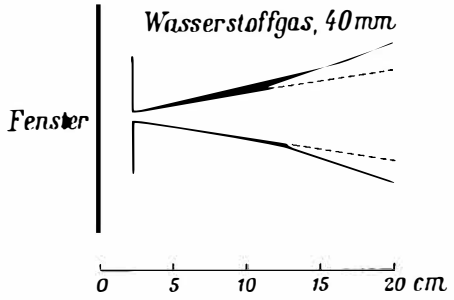


Abb. 103. Nachweis der Atomdurchquerungen.

Bündel, wie sie im Inneren des Erzeugungsrohres das Fenster treffen, sondern allseitig gerichtet heraus (wie es Abb. 101 andeutet); das Aluminium ist also ein trübes Medium für sie, etwa wie Milchglas für Licht. Dasselbe zeigt sich auch bei anderen Stoffen von einiger Dichte; die Ausbreitung der Strahlen in der Materie ist diffus, nicht geradlinig wie im Vakuum.

Das kleine Fenster wirkt infolgedessen für den Beobachtungsraum wie eine nahe punktförmige, allseitig strahlende Quelle. Ist sehr verdünnte Luft im Beobachtungsraum, so erhält man die nach früherer Kenntnis (440, Abb. 99) zu erwartenden scharfen Schattenbilder von undurchlässigen Gegenständen, wie Drähten oder Lochschirmen. Je höher aber der Luftdruck im Beobachtungsraum ist, desto verwaschener werden die Schatten.

Ein Schirm mit kleinem Loch läßt bei steigendem Druck zuerst einen matten Hof um den scharf begrenzten Phosphoreszenzfleck auf dem Schirm erkennen; der Hof wird dann zunehmend heller und größer, so daß der Fleck in seiner Mitte ununterscheidbar wird, bis zuletzt, bei gewöhnlichem Druck, überhaupt nur fast allseitige Strahlverbreitung hinter der Schirmöffnung merklich wird.

Schon wenige Millimeter hinter einem siebartig durchlöcherten Blech, das etwa 1 cm vom Fenster absteht, findet man in gewöhnlicher Luft nur gleichmäßige Erhellung eines Phosphoreszenzschirmes.

Abb. 102 zeigt (etwas verkleinert) die Strahlausbreitung hinter einem senkrecht zur Zeichnungsebene gerichteten, etwa 1 cm vom Fenster abstehenden Spalt in gewöhnlicher Luft. Der Phosphoreszenzschirm, dessen quadratischer Umriß sichtbar ist, ist streifend zum Strahl an den Spalt gestellt. Die gestrichelten Linien auf ihm zeigen die äußersten Grenzen geradlinig vom Fenster durch den Spalt gehender Strahlung; man sieht die sehr starke seitliche Ausbreitung an der Erhellung des Schirmes.

Abb. 103 gibt eine ebensolche Darstellung von der Ausbreitung in Wasserstoffgas von nur 40 mm Quecksilberdruck. Hier ist, wie der Maßstab zeigt, erst in etwa 10 cm Abstand vom Fenster gut merkliche Abweichung von der Geradlinigkeit vorhanden. Verfeinerte Untersuchung mit elektrischer Messung der Strahlintensität zeigt allerdings (495), daß auch auf kürzerem Wege schon starke seitliche Zerstreuung stattfindet; dennoch ist es sehr bemerkenswert und — wie sogleich ersichtlich wird (444) — bedeutungsvoll, daß der *Hauptteil der Strahlung auf so langem Wege fast geradlinig* durch das Gas gehen kann.

Die durch vervielfältigte Beobachtung festgestellte Tatsache, daß alle Materie den Kathodenstrahlen gegenüber als trübes Medium sich zeigt, beweist, daß diese Strahlen etwas viel Feineres sein müssen als selbst Licht mit seinen kleinen Wellenlängen, die aber den Atomen gegenüber doch groß sind. Die Durchmesser der Atome und Moleküle verschwinden fast in einer Lichtwellenlänge; daher wirken die Lichtwellen in der Hauptsache nicht mit einzelnen Atomen zusammen, sondern sie ergreifen große Mengen benachbarter Atome und Moleküle gleichzeitig mit ihren elektrischen Kräften, so daß der innere Aufbau der Materie nicht merklich wird. Bei den Kathodenstrahlen treten dagegen, wie die Störung ihres geradlinigen Laufes selbst durch verdünnte Gase zeigt, *die Moleküle (Atome) als gesonderte Hindernisse* auf (vgl. 451).

444. *Atomdurchquerung.* — Es können aber *nicht alle Moleküle am Strahlweg stark ablenkend* wirken; denn die Diffusion müßte dann noch stärker sein; der Fall der Abb. 103 zeigt dies. Es liegt im Wasserstoffgas von 40 mm Druck schon auf je 0·02 mm geradlinigen Weges im Mittel ein Gasmolekül[1]). Wären die Kathodenstrahlen äußerst kleine geschleuderte Partikel (was sie ungefähr sind, 486), so würden sie im Mittel nur diese kurze Strecke in dem Gas zurücklegen können, ohne ein Molekül zu treffen; daß tatsächlich, wie der Verlauf in Abb. 103 zeigt, bis 10 cm nahe geradlinig zurückgelegt

[1]) 0·02 mm ist nach der gut gesicherten kinetischen Gastheorie die mittlere freie Weglänge verschwindend kleiner, schnell bewegter Partikel im Wasserstoffgas von 40 mm Druck (W, Gl. 90 ohne $4\sqrt{2}$ im Nenner, entsprechend der Kleinheit und schnellen Bewegung der Partikel).

werden, dies beweist, daß der Strahl viele tausend Moleküle merklich unbeeinflußt durchdringen kann, so daß im Mittel noch mehr Moleküle erforderlich sind, um die als Diffusion zu beobachtenden Ablenkungen hervorzubringen. Die Strahlen können also Atome durchqueren, und eine einzelne Durchquerung bringt im Mittel nur geringe Ablenkung hervor.

445. Massenproportionalität der Diffusion. — Sehr bemerkenswert ist es, daß die Stärke der Diffusion in einem gegebenen Medium in erster Annäherung nur nach der Dichte des Mediums sich richtet. Es ist dies an 12 verschiedenen Gasen bei verschiedenen Drucken untersucht. Schweflige Säure ist z. B., der großen Dichte entsprechend, sehr viel trüber als Wasserstoff, welches das klarste Gas ist; bringt man aber schweflige Säure durch Druckverminderung auf gleiche Dichte mit Wasserstoffgas von 1 Atm. Druck, so sind beide Gase auch sehr nahezu gleich trübe. Daß feste Körper schon in sehr dünnen Schichten starke Diffusion ergeben, wie es das Beispiel des Aluminiumfensters zeigt, dies stimmt auch mit der im Vergleich zu den Gasen sehr großen Dichte der festen Körper.

Das eigentümliche Zusammenwirken der Kathodenstrahlen mit der Materie bei der Diffusion, wobei die Moleküle einzeln zur Geltung kommen (443) und die Atome durchquert werden (444), zeigt unmittelbar die Eignung der Kathodenstrahlen als Mittel zur Erforschung der Atome. Es werden hier neuartige, meßbare Wirkungen der Atome verfolgbar, und die Durchquerungen liefern Kunde aus dem Inneren der Atome. Da die Diffusion Ablenkungen der Strahlen bei den Durchquerungen zeigt, und da nach allem Bekannten nur magnetische und elektrische Felder solche Ablenkungen hervorbringen (441, 442, 453), ist das Vorhandensein elektromagnetischer Felder im Atominneren unmittelbar angezeigt. Die Massenproportionalität der Diffusion zeigt die Stärke dieser Felder in Zusammenhang stehend mit der Atommasse.

Neben der Diffusion ist auch die Absorption der Strahlen (447) eine solche, zur Erforschung der Atome dienliche Wirkung der Materie, und sie zeigt sich ebenfalls massenproportional (448); sie ist viel eingehender quantitativ untersucht als die Diffusion, was einen weiteren, wichtigen Schluß in Bezug auf das Atominnere gestattet (451).

446. Geordnete Diffusion. — Der soeben betrachteten massenproportionalen und räumlich gleichförmigen Diffusion, welche Ergebnis der Durchstrahlung sehr großer Zahlen von Atomen ist, steht eine stoffabhängige und geordnete Diffusion gegenüber, die beobachtet wird, wenn auf dem Wege eines schmalen Strahlenbündels im Vakuum eine nicht zu große Zahl von Atomen in dünner Schicht sich befindet. Man sieht dann auf dem auffangenden Schirm oder in photographischer Abbildung um den zentralen Fleck herum, der dem unbeeinflußten Teil der Strahlen entspricht, Ringe oder Gruppierungen von mannigfach geformten Flecken, die etwa an die Beugungsbilder der Optik erinnern. Die Ringe erscheinen bei Durchstrahlung von dünnsten Metallhäuten oder ins Vakuum geblasenen Gasstrahlen, die Flecke bei Kristallschichten, wie Glimmer. Dies sind offenbar Wirkungen der von den Kathodenstrahlen durchquerten Atome, Wirkungen, die aber Besonderes anzeigen[1]), während die ungeordnete,

[1]) Es sind auch hinter schattenwerfenden Kanten Streifen beobachtet worden, die ganz den durch Beugung und Interferenz von Licht beim Vorbeigehen an Schirmkanten entstehenden

massenproportionale Diffusion sowie auch die sogleich zu behandelnde Absorption Kenntnis von der allgemeinen Beschaffenheit der Materie geben (451).

447. Absorption der Kathodenstrahlen. — Man bemerkt hinter zunehmend dicken, durchstrahlten Schichten außer der Diffusion eine allmähliche Abnahme der am Phosphoreszenzschirm zu beobachtenden Intensität der Strahlen. Es kann das an Gasschichten ebenso wie auch an Metallblättern beobachtet werden, die man zwischen das Aluminiumfenster des Erzeugungsrohres (442) und den Schirm bringt. Offenbar hält durchstrahlte Materie stets einen Teil der Strahlung vom Schirm ab; wir nennen diesen Teil „absorbiert".

Die Intensitätsabnahme durch Absorption ist im Falle des fast punktförmigen Fensters als Strahlenquelle begleitet von der als Folge der divergenten Ausbreitung eintretenden Intensitätsabnahme, die man bei Vakuum im Beobachtungsraum für sich allein beobachten kann. Beides wird zusammengefaßt in der Gleichung für die Intensität I im Abstande r vom Fenster hinter einer absorbierenden Schicht von der Dicke d:

$$I = I_0 \frac{1}{r^2} e^{-ad}, \qquad 447)$$

wobei I_0 die Intensität im Abstande 1 cm vom Fenster im Vakuum ist ($I = I_0$ bei $r = 1$ und $a = 0$) und a das Maß der Absorption in der Schicht, welches wir „Absorptionsvermögen" des betreffenden Stoffes nennen. Die Gleichung enthält nur die einfachsten möglichen Annahmen, nämlich 1. das für alle von Punkten ausgehenden Wirkungen bewährte Gesetz des verkehrten Abstandsquadrates und 2. die Annahme, daß jede gleiche Dickenstufe des Mediums den gleichen Bruchteil der an sie kommenden Strahlen vom Schirm abhalte. Letzteres ist die Bedeutung der Exponentialfunktion[1]).

Die Prüfung der Gleichung in mehrartigen Versuchsreihen hat sie — und damit auch die in ihr enthaltenen Annahmen — mit bemerkenswerter Genauigkeit bestätigt. Man sieht daraus — obgleich sich zeigt, daß die Absorption kein

(O 145) gleich sind und deren Lagen nach der für Licht geltenden Gleichung auch richtig berechnet werden, wenn man eine geeignete, sehr kleine Wellenlänge einsetzt. Es erscheint dies als der einfachste bisher beobachtete Fall von Interferenz-ähnlichen Erscheinungen bei Kathodenstrahlen; Annahmen über geometrische Beschaffenheit der „beugenden", die Ringe oder Streifen ergebenden Schichten spielen hier keine Rolle. Man kann daher wohl versucht sein, aus den beobachteten Streifen den Schluß zu ziehen, daß längs des Kathodenstrahles einander entgegengesetzte Zustände in regelmäßiger Abwechselung, wie bei einer Welle verteilt seien, sowie es für Licht und Schall mit Erfolg aus beobachteten Interferenzerscheinungen geschlossen wurde (O 121). Welches diese einander entgegengesetzten, beim Zusammentreffen einander aufhebenden, eine Wegweisung (vgl. O 162, 163) der Elektronen ergebenden Zustände seien, ist nicht gefunden. Vielleicht hängen sie mit den Kreiselungen der Elektronen (304) zusammen. Allerdings hat man sich bloßer Interferenzerscheinungen, ohne Beugung, an Kathodenstrahlen noch nicht versichern können. Die „Beugung" kann einfach Wirkung der über die Oberfläche der Kante hinausgreifenden elektromagnetischen Felder der Atome sein (525), wie bei der gewöhnlichen Diffusion (Atomdurchquerung). Es sind diese Erscheinungen von „Elektronenwellen" freilich bisher fast nur an der Hand hypothetisch vorgegebener Rechnungen beachtet worden, wobei man eine Wellenlänge h/mv annimmt (h Wirkungsquant W 180, m Elektronenmasse, v Strahlgeschwindigkeit). Naturstudium mit gehöriger Variation der Versuchsbedingungen ist hier fast gänzlich versäumt worden. Ohne dieses wird man aber der Wirklichkeit nicht beikommen. Ein Flickwerk von Rechnungen ist die Natur nicht.

[1]) Siehe Anhang E VII; e ist die „natürliche Zahl" der Mathematik.

einfacher Vorgang und von allerlei Nebenvorgängen begleitet ist (vgl. 450, 488, 493) —, daß das durch die Gleichung definierte Absorptionsvermögen a als eine Hauptkonstante des Zusammenwirkens von Kathodenstrahlen mit der Materie zu betrachten ist.

Nach seinem Vorkommen in der Gl. 447 bedeutet dieses Absorptionsvermögen a das Reziproke derjenigen Schichtdicke, welche die Strahlintensität auf $1/e$ herabsetzt ($e = 2{\cdot}718\ldots$); es hat danach die Dimension (291) cm^{-1}.

448. Massenproportionalität der Absorption. — Die Versuche zur Prüfung der Gleichung und zugleich zur Messung der Absorptionsvermögen verschiedener Stoffe sind mit zunehmenden Verfeinerungen durchgeführt. Wir gehen darauf nicht besonders ein, weil die Hauptsache — die Massenproportionalität der Kathodenstrahlabsorption — schon bei der einfachsten Durchführungsweise ersichtlich wird. Man kann die Strahlintensität, schon ohne sie mittels Kenntnis der Natur der Strahlen definiert zu haben (489), zutreffend mit dem Phosphoreszenzschirm meßbar machen, wenn man diesen nur zur Erkennung von Intensitäts-Gleichheit benutzt und zu quantitativ bekannter Intensitätsschwächung der Strahlen ein ausgemessenes Sieb in der trüben Luft zu Hilfe nimmt (443).

In dieser Weise wurden die in Tab. 52 verzeichneten Absorptionsvermögen a verschiedener Stoffe gemessen. Man sieht die außerordentlich großen Unter-

Tab. 52. **Massenproportionalität der Kathodenstrahlabsorption.**

Stoff	Absorptionsvermögen a [1])	Dichte D	$\frac{a}{D}$
Wasserstoff g. 3·3 mm .	0·00149	0·000000368	4040
Atm. Luft 0·78 „ .	0·00416	0·00000125	3330
Wasserstoff g. 760 „ .	0·467	0·0000349	5610
Atm. Luft „ „ .	3·42	0·00123	2780
Schwefelige S. „ „ .	8·51	0·00271	3110
Kollodiumhaut	3310	1·10	3010
Glas	7810	2·47	3160
Aluminium	7150	2·70	2650
Glimmer	7250	2·80	2590
Kupfer	23800	8·90	2670
Silber	32200	10·5	3070
Gold	55600	19·3	2880
	cm^{-1}	$gr\,cm^{-3}$	

schiede der Durchlässigkeiten. Wasserstoffgas von gewöhnlichem Druck ist z. B. rund 10^5mal durchlässiger als Gold; so verschiedene Stoffe wie Glas und Aluminium — besonders auch in der Lichtdurchlässigkeit verschieden — sind dagegen nahe gleich absorbierend. Ordnet man die Stoffe nach ihrer Dichte D, wie es in der Tabelle geschehen ist, so findet man, daß dies auch die Reihenfolge ihrer Absorption ist, und es besteht sogar angenäherte Proportionali-

[1]) für $\frac{1}{3}$ Lichtgeschwindigkeit der Strahlen.

tät zwischen Absorption und Dichte, wie es die Verhältniszahlen a/D in der letzten Spalte der Tabelle zeigen. Bei der sehr großen Mannigfaltigkeit der untersuchten Stoffe, bei der Verschiedenheit der Aggregatzustände und bei dem großen, fast über alle überhaupt vorkommenden Dichten sich erstreckenden Bereich der Untersuchung ist dieses einfache Ergebnis der Massenproportionalität der Absorption sehr bedeutungsvoll. Es besagt, daß gleiche Massen gleich absorbierend wirken, woraus sie auch bestehen mögen.

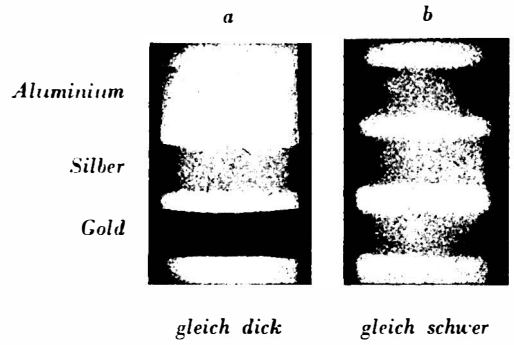


Abb. 104. Massenproportionalität der Kathodenstrahlabsorption.

Abb. 104 zeigt eine besondere Nachprüfung dieses Ergebnisses in einem Beispielsfalle. Es sind unter a 3 Streifen gleicher Dicke von Aluminium, Silber und Gold und unter b 3 Streifen gleichen Gewichtes derselben Metalle in den Weg der Strahlen gestellt; man sieht ihre wegen der Trübung der freien Luft etwas verwaschenen Schattenbilder auf einer photographischen Platte und zwar hier in positiver Kopie, so daß man denselben Anblick wie an einem Phosphoreszenzschirm hat. Der Schatten des Aluminiumblattes ist in a kaum zu sehen, wegen dessen geringer Masse, wogegen der Schatten des schweren Goldblattes ganz schwarz ist; in b aber sind die 3 Schatten kaum unterscheidbar, wie es der Massenproportionalität der Absorption entspricht.

449. Abweichungen von der Massenproportionalität. — Daß die Massenproportionalität der Absorption nur angenähert besteht, dies zeigen schon die Zahlen a/D der Tab. 52. Besonders Wasserstoff ist danach merklich undurchlässiger als es seiner Masse entspräche. Diese erhöhte Absorption des Wasserstoffs hat sich auch in seinen Verbindungen verschiedener Art gezeigt, die nach Maßgabe ihres Wasserstoffgehaltes ebenfalls erhöht absorbieren. Ebenso haben auch Verbindungen von Brom und besonders Jod übermassenproportionale Absorption gezeigt. Helium absorbiert im Gegenteil deutlich weniger als massenproportional.

Bemerkenswert ist hierbei die Wiederkehr von Atomeigenschaften in chemischen Verbindungen, fast unabhängig von der Art der Bindung, während das Verhalten der Stoffe gegen Licht fast ganz von der Bindungsweise der Atome abhängig ist.

450. Absorption und Diffusion. — Diffusion (443) ist die allmählich steigende Ablenkung der Strahlen eines Bündels beim Fortschreiten im Medium. Absorption (447) ist die gänzliche Ausscheidung von Strahlen aus dem Bündel. Man bemerkt, daß bei Durchlässigkeitsbeobachtungen, aus welchen das Absorptionsvermögen a (Gl. 447) hergeleitet wird, Absorption und Diffusion zusammenwirken. Eine gesicherte Trennung beider ist allgemein noch nicht durchgeführt, vielleicht mit Schärfe auch nicht in allen Fällen durchführbar, weil Übergänge von Diffusion zu „unechter" Absorption (Reflexion) vorkommen (492). Doch fanden wir die Diffusion, für sich allein beobachtet, ebenfalls angenähert massenproportional (445), so daß die angenäherte Massenproportionalität als allgemeines Ergebnis für das Verhalten der Materie Kathodenstrahlen gegenüber betrachtet werden kann.

451. Bedeutung der Massenproportionalität. — Dieses Ergebnis, daß gleiche Massen beliebigen Stoffes gleich wirken, 4 Sauerstoffatome ($4 \cdot 16 = 64$) z. B. ebenso wie 2 Schwefelatome ($2 \cdot 32 = 64$) oder 1 Kupferatom ($= 64$), bedeutet in einfachster Auffassung, daß alle Atome aus einerlei Stoff bestehen und nur verschiedene Mengen desselben darstellen.

Diese Deutung ist durch den Nachweis berechtigt, daß die Atome einzeln, unabhängig von Gruppierungen, auf die Strahlen wirken, wie es die Unabhängigkeit der Absorption von Aggregatzustand und chemischer Beschaffenheit zeigt (448, 449).

Die Abweichungen von der Massenproportionalität (449), worin die verschiedenen Atomsorten Besonderheiten zeigen, sind dann als Besonderheiten des Aufbaues der verschiedenen Atome aus dem einheitlichen Stoffe zu deuten (542).

Der Gedanke des Aufbaues aller Atome aus einheitlichem Stoffe konnte viel früher schon an die sogar ohne Abweichungen geltende Massenproportionalität der Schwerkraft — allgemeiner der Gravitation — geknüpft werden; doch fand er — wie wir schon bemerkten (M 128) — immer keine Stütze in weiterer Erfahrung. Erst die Untersuchung der Kathodenstrahlen und dann der anderen neueren Strahlungen hat festen Halt und dann auch eingehendere Auskünfte gegeben durch Beibringung einer Fülle von Tatsachen, auf die in vollständigem Zusammenhang noch einzugehen ist (520 u. f.).

Natur der Kathodenstrahlen.

452. Keine bewegte Materie. — Um wohlgegründete Auskunft über die Natur der Kathodenstrahlen zu erhalten, war zuerst die Grundfrage zu stellen, die auch beim Schall und beim Licht vorlag, als sie noch unbekannte Vorgänge waren: Ob sie mit den wägbaren Stoffen, mit der Luft und den anderen Gasen, wesentlich zu tun haben, worin sie von jeher auftraten, oder ob sie auch ohne Materie bestehen können? Oder, wie man nach der hergebrachten Zweiteilung der Stoffwelt (Einl. 5, Bd. I) auch kurz sagen kann: ob sie Vorgänge in der Materie sind oder Vorgänge im Äther?

Die Antwort erfolgt mit der Luftpumpe, so wie Guericke für Schall und für Licht sie gesucht hat; es war zu untersuchen, wie Kathodenstrahlen gegenüber dem luftleeren Raum sich verhalten. Da man keine im luftleeren Raume wirkende Quelle von Kathodenstrahlen kannte, war der Weg zur Entscheidung überhaupt erst durch das Entladungsrohr mit dem Aluminiumfenster (442) eröffnet; es war ein vollständig auszupumpender Beobachtungsraum an das Fenster zu schalten und vor allem zuzusehen, ob die durch das Fenster dringenden Strahlen in diesen Raum, der gar keine Erzeugung der Strahlen durch elektrische Kräfte gestattet, sich ausbreiten können.

Die Durchführung des Versuches ergab bejahende Beantwortung; die Ausbreitung der Strahlen kann im Vakuum sogar bis zu sehr großen Abständen verfolgt werden, und sie ist vollkommen scharf geradlinig, sofern nicht Magnetfelder Krümmung hervorbringen[1]).

[1]) Der im feldfreien Raume scharf gradlinige Lauf der Kathodenstrahlen, zusammen mit ihrer Ablenkbarkeit durch elektrische und magnetische Felder, gibt die Möglichkeit, Strahlengänge

Weiter war auch festzustellen, daß die Strahlen keine Materie in den Beobachtungsraum mit sich bringen. Daß sie keine festen Beschläge geben, die an Wänden sich sammeln, wie es in Entladungsröhren in der Nähe von Kathoden oft beobachtet wird, dies war schon daraus klar, daß Kathoden aus Aluminium solche Beschläge nicht geben, während sie doch intensive Kathodenstrahlen entwickeln. Für abgeschleuderte Metallteile der Kathode konnte man schon danach die Strahlen nicht halten; aber sie bringen auch keine Gasmoleküle in den ausgepumpten Beobachtungsraum mit sich. Die Ansammlung von Gas hätte bei der mäßigen Größe dieses Raumes leicht durch die Möglichkeit, dann elektrische Entladungen in ihm zwischen vorgesehenen Elektroden zu erhalten, nachgewiesen werden können, sogar auch mit Feststellung der Art des Gases durch das Spektrum des Entladungslichtes; aber der Beobachtungsraum blieb so leer, daß er Entladung überhaupt nicht durchließ; nur die Fluoreszenzen an der Glaswand zeigten das Bestehen der Strahlen in ihm an.

Daraus folgt, daß die Strahlen nichts Materielles sind. Im besonderen ist damit auch die schon frühe naheliegend gewesene Vermutung beseitigt, daß sie von der Kathode der Entladungsröhre abgeschleuderte, negativ geladene Gasmoleküle oder Atome sein könnten[1]), was allerdings der magnetischen Ablenkbarkeit entsprochen hätte.

453. Reine Versuche über magnetische und elektrische Ablenkung der Strahlen. — Um weiter zu erfahren, welcher Art nicht materieller Vorgänge die Strahlen seien, waren deren schon bekannte Eigenschaften näher, quantitativ und vor allem in reinen Versuchen zu untersuchen. Zu diesen Eigenschaften gehörte besonders die magnetische Ablenkbarkeit und — weiter sehr versprechend zu Aufschlüssen — eine auch schon früh beobachtete elektrische Beeinflußbarkeit der Strahlen. Letztere zeigte sich darin, daß die Strahlen in den Entladungsröhren von negativen Nebenelektroden weggelenkt, zu positiven hingebeugt wurden, was — wie die magnetische Ablenkbarkeit (441) — ganz dem Verhalten negativ geladener, bewegter Massen gleicht. Welcher Art diese

---

hervorzubringen wie bei Licht in den optischen Geräten. Es gelingt, Kathodenstrahlen, die von einem Punkte ausgehen, wieder nach einem Punkte hin konvergieren zu lassen, wie es Linsen für Lichtstrahlen tun. Stromspulen mit geeigneten, durch Eisen geformten Magnetfeldern, auch geeignet geformte elektrische Felder leisten dies gut und wirken so als „Sammellinsen" für Kathodenstrahlen. Darauf beruht das schon weit verfeinerte „Elektronenmikroskop". Man bestrahlt den abzubildenden Gegenstand mit Elektronen (von etwa ½ Lichtgeschwindigkeit), die von seinen verschiedenen Teilen (je nach deren Dichte) verschieden stark gestreut werden (443, 445), wodurch sie in den betreffenden, durch die Linse entworfenen Bildpunkten mit entsprechend verschiedener Intensität zusammenkommen, was eine formgetreue Abbildung des Gegenstandes auf dem Leuchtschirm oder der photographischen Platte ergibt. Die Vergrößerung kann hier sehr weit getrieben werden (daher auch „Übermikroskop"); sie muß begrenzt sein durch Wirkung der elektrischen Eigenfelder der Strahlen, die aber bei geringen Intensitäten verschwindend klein ist. Man hat schon 50000fache Vergrößerung benutzt (vgl. die Grenzen des optischen Mikroskops O 69).

[1]) Man könnte meinen, eine solche Vermutung wäre schon dadurch widerlegt, daß die Strahlen das Aluminiumfenster durchsetzen. Eine luftdichte Wand sollte für Gasatome durchlässig sein? und sollte, leitend und mit der Erde verbunden, durchtretende elektrische Ladung nicht zur Erde ableiten? Beide Fragen sind — entgegen aller damaligen Erwartung — zu bejahen; die schnell fortschreitende Erfahrung zeigte es (550, 456). So sehr ist unbekannte Wirklichkeit oft anders, als nach Bekanntem gedacht werden kann!

nach dem schon Beobachteten nicht materiellen Massen etwa seien, dies konnten nun reine und quantitative Versuche mit der magnetischen und der elektrischen Ablenkbarkeit zeigen —, falls die letztere überhaupt im Vakuum vorhanden bleibt und nicht Wirkung der Entladungserscheinungen ist, welche im Erzeugungsrohr angebrachte Nebenelektroden stets mit sich bringen. Viel unreine Versuche waren hierüber schon angestellt worden ohne überzeugende Aufklärung zu geben. Die reinen, außerhalb des Erzeugungsrohres im Vakuum auszuführenden Versuche waren mittels des Aluminiumfensters gut möglich; die elektrische Ablenkbarkeit blieb im Vakuum erhalten, wie die magnetische, und war einwandfrei meßbar.

454. Schlüsse aus den Ablenkungen. — An die in dieser Weise rein durchgeführten Messungen der magnetischen und der elektrischen Ablenkungen der Kathodenstrahlen knüpfen sich die folgenden Berechnungen, die dadurch gegeben sind, daß nach Bekanntem nur negativ elektrisch geladene, bewegte Massen solche Ablenkungen ergeben könnten und daß nun nach zweifelsfreien,

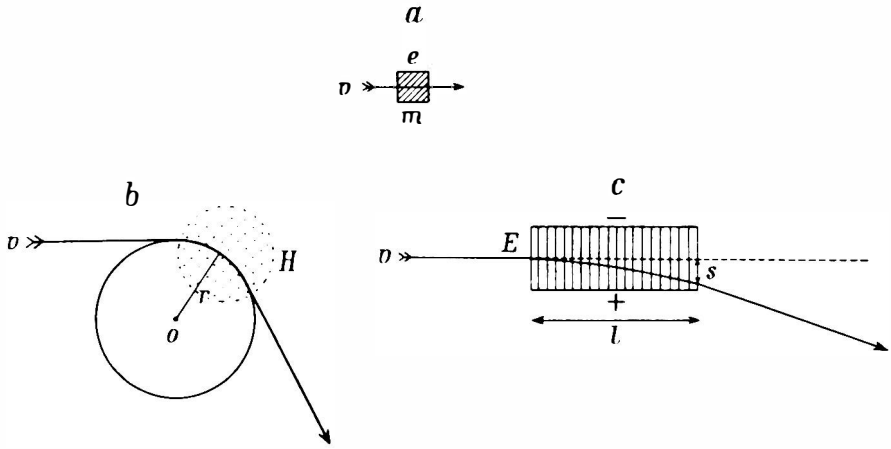


Abb. 105. Magnetische und elektrische Ablenkung der Kathodenstrahlen.

quantitativen Beobachtungen zuzusehen ist, inwieweit die Kathodenstrahlen etwa tatsächlich als solche Massen sich zeigen.

Es sei e die in je 1 cm³ Kathodenstrahlvolum im Vakuum enthaltene negative Elektrizitätsmenge; sie sei mit der Masse m verbunden und habe die Geschwindigkeit v (Abb. 105a). Es geht dann durch je 1 cm² Querschnitt des Strahles in 1 sek die negative Elektrizitätsmenge $e \cdot v$, so daß jedes Strahlenbündel von 1 cm² Querschnitt einen gegen die Strahlrichtung fließenden (positiven) Strom $J = ev$ darstellt (vgl. 297).

Geht ein solches Strahlenbündel durch ein Magnetfeld von der Stärke H quer zu den Kraftlinien, so erfährt dasselbe, als Strom, eine Kraft in der dritten Senkrechten, welche für die Längeneinheit, d. i. für 1 cm³ Strahlraum $J \cdot H = evH$ beträgt (316). In Abb. 105b ist v die Strahlrichtung, H das punktiert umgrenzte Magnetfeld, dessen Kraftlinien senkrecht zur Zeichnungsebene

ſtehen. Der Strahl erfährt dann ſofort beim Eintritt in das Magnetfeld die ſoeben angegebene Kraft in Richtung der dritten Senkrechten, d. i. nach dem Punkte o hin. Daß der Strahl nicht in beliebig ſteiler Krümmung nach o hin abbiegt, dies iſt als Trägheitswirkung aufzufaſſen, entſprechend der gemachten Annahme einer beſtimmten Maſſe m im cm^3 Strahlraum. Da die Kraft evH im Magnetfeld fortdauernd quer zur jeweiligen Bewegungsrichtung wirkt, ſo wird jedes cm^3 des Strahles unter dem Einfluß dieſer Kraft und der Maſſe m eine Kreisbahn beſchreiben, deren Radius r ſo ſich einrichtet, daß die gegen o hin wirkende magnetiſche Zentripetalkraft evH gleich iſt der durch die Trägheit bedingten Fliehkraft mv^2/r (M, Gl. 196b). Man hat daher die Gleichung $evH = mv^2/r$ oder

$$eHr = mv\,, \qquad 454a)$$

worin H und r meßbar[1]), e, m und v aber Unbekannte ſind. Beim Austritt aus dem Magnetfeld verſchwindet mit der Zentripetalkraft auch die Fliehkraft (M 194 u. f.) und der Strahl geht in Richtung der letzten Kreistangente geradlinig weiter, wie es die Abb. anzeigt.

Eine zweite Gleichung für die 3 Größen e, m und v gibt die Beobachtung der Ablenkung im elektriſchen Feld (453). Dasſelbe befinde ſich zwiſchen den beiden Kondenſatorplatten — und + (Abb. 105c) und habe die Stärke E; der Strahl v trete quer zu den in der Abbildung erſichtlichen Kraftlinien in das Feld ein. Es erfährt dann jedes ſeiner cm^3 die Kraft $e \cdot E$ (65) und nach dem Grundgeſetz aller Bewegung (M 115) die Beſchleunigung $b = eE/m$, und zwar dauernd in Kraftlinienrichtung nach der poſitiven Seite hin. Dies gibt eine paraboliſche Bahn, gleich der eines horizontal geworfenen Körpers (M 141), wobei der in Kraftrichtung mit der Beſchleunigung b zurückgelegte Weg $s = bt^2/2$ iſt (M 134). Die Dauer t der Wirkung der Kraft iſt $t = l/v$, wenn l die Länge des Feldes iſt (Abb. 105c). Damit wird

$$s = eEl^2/2v^2m\,, \qquad 454b)$$

und dies iſt, mit Gl. 454a, eine zweite Gleichung für die 3 Unbekannten e, m und v; E, l und s ſind meßbar[2]).

Faßt man die 3 Unbekannten zu zweien — nämlich e/m und v — zuſammen, ſo genügen die zwei Gleichungen zu deren Ermittelung. Man hat dann:

$$e/m = El^2/2H^2r^2s \quad \text{und} \quad v = El^2/2Hrs\,.$$

Es ergab ſich, hiernach berechnet, aus Meſſungen der Ablenkungen in reinen Verſuchen im vollſtändigen Vakuum (435), für die Kathodenſtrahlen der Entladungsröhre Abb. 101 mit der dort angegebenen Spannung (442)

e/m von der Größenordnung 10^8 Coulomb/gr
und v zu rund $^1/_3$ Lichtgeſchwindigkeit.

Es genügt für die zunächſt zu ziehenden grundlegenden Schlüſſe, nur die Größenordnungen zu wiſſen, wenn nur die Zahlen ohne Täuſchung durch fremde Dinge, nämlich aus reinen Verſuchen gewonnen ſind. Auf Ermittelungen von beſonderer Genauigkeit gehen wir ſpäter ein (479).

---

[1]) Zur Meſſung von H ſiehe 272; r kann etwa aus gemeſſener Ablenkung des Strahl-Endes ermittelt werden.

[2]) E aus Spannung V und Abſtand a der Kondenſatorplatten ($V = Ea$, vgl. 33 u. f., 65, 84); s am beſten in berechenbarer Vergrößerung am Strahlende.

Zunächst fällt an den Zahlen die außerordentliche Größe des Verhältnisses e/m auf. Schon die Einheit Coulomb ist sehr groß (15), und das 10^8-fache dieser Einheit mit so wenig Masse, wie nur 1 gr verbunden, dies war vorher niemals beobachtet worden. Die konzentriertesten Ladungen, die größten bei kleinster Masse, die bis dahin feststellbar waren, sind die der Jonen der Elektrolyse. Es findet sich dort 1 Coulomb an 1·118 mgr Silber (175) oder, am Konzentriertesten, an Wasserstoffatomen mit 107 mal kleinerer Masse: 1 Coulomb an rund 0·01 mgr, d. i. rund 10^5 Coulomb verbunden mit 1 gr Masse, während hier, bei den Kathodenstrahlen, rund 10^8 Coulomb mit 1 gr Masse erscheinen.

Da die Kathodenstrahlen überhaupt nicht aus Atomen bestehen (452), ist es nach Bekanntem das Nächstliegende, zu denken, daß hier, in diesen Strahlen, die schon bei der Elektrolyse erkannten Elementarladungen der Jonen, die elektrischen Elementarquanten (193), abgetrennt von Atomen auftreten, und zwar die Elementarladungen der negativen Elektrizität, entsprechend der Abschleuderung von der negativ geladenen Kathode. Diese Elementarladungen zeigen sich nun mit bestimmter Masse begabt, die allerdings — entsprechend der Abtrennung von allen Atomen — sehr klein ist im Verhältnis zur Ladung; was auch die große Geschwindigkeit — $^1/_3$ Lichtgeschwindigkeit — verständlich macht. Diese Deutung hat sich bewährt, wie alles folgende zeigt.

Ganz neu dabei ist es, daß hier die Elektrizität an sich, ohne Materie, auftritt und daß sie eine bestimmte, wenn auch sehr geringe Masse hat.

Zur Prüfung der so gewonnenen Vorstellungen ist vor allem die Entscheidung der Frage erforderlich, ob die Kathodenstrahlen tatsächlich negative Ladung tragen. Dies ist mit bejahendem Erfolg geschehen, wie das Folgende zeigt (455—457).

455. Kathodenstrahlen machen die Luft elektrisch leitend. — Es wäre leicht gewesen, die Kathodenstrahlen als geschleuderte Elektrizität zu erkennen, wenn Versuche hierzu in Luft möglich gewesen wären. Stellt man dem Fenster der Entladungsröhre, Abb. 101, eine isolierte Metallplatte gegenüber, welche die Kathodenstrahlen auffängt, so erhält man an dem mit der Platte verbundenen Elektroskop keine Ladung; man findet vielmehr, daß eine der Platte vorher mitgeteilte Ladung, positiv oder negativ, sofort verschwindet, sobald Strahlen aus dem Fenster kommen. Die Luft in der Nähe des Fensters wird also durch die Kathodenstrahlen in einen ziemlich guten Leiter verwandelt; sie behält ihr Leitvermögen auch noch eine Weile nach der Durchstrahlung. Man überzeugt sich davon durch Fortströmenlassen der Luft vom Fenster nach einem vor Strahlung geschützten Raum, in welchem ihr nachdauerndes Leitvermögen beobachtet werden kann. Wir kommen auf dieses an sich wichtige, der Untersuchung der Strahlen selbst allerdings hinderliche Ergebnis der Leitfähigkeitserregung in Luft durch die Strahlen noch zurück (505).

456. Auffangung der elektrischen Ladung der Kathodenstrahlen. — Reine Versuche zur Prüfung der elektrischen Ladung der Kathodenstrahlen müssen im vollständigen Vakuum ausgeführt werden. Man schaltet dazu das in Abb. 106 in seinem Hauptteil dargestellte, auszupumpende Rohr an das Fenster der Erzeugungsröhre (Abb. 101), so daß ein ausgeblendetes Strahlenbündel S die Platte P im Gehäuse G G (nicht aber die Vorderwand des

letzteren) treffen kann. Man erhält an dem mit der Platte verbundenen Elektroskop starke negative Ladungen.

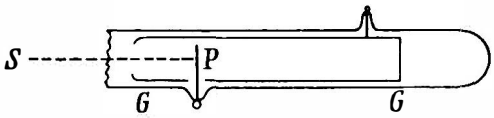


Abb. 106. Nachweis der Ladung der Kathodenstrahlen im Vakuum.

Eine Möglichkeit wäre es, daß diese Ladungen nicht mit den Strahlen an die Platte gekommen wären, sondern daß die Wirkung der Strahlen (ähnlich der lichtelektrischen Wirkung, 465) vielleicht darin bestünde, von der bestrahlten Platte positive Elektrizität an die Umgebung gehen zu lassen. Es müßte dann die positive Elektrizität am Gehäuse G G zu finden sein, und Gehäuse und Platte zusammen müßten keine Ladung ergeben. Dem ist aber nicht so; es zeigt auch das Gehäuse nur negative Ladungen (vgl. 496), und die stärksten negativen Ladungen erhält man, wenn Gehäuse und Platte zusammen mit dem Elektroskop verbunden sind.

Damit ist unmittelbar nachgewiesen, daß die Strahlen bewegte negative Elektrizität sind (1898).

Daß Elektrizität in Gestalt dieser Strahlen durch metallische, leitend mit der Erde verbundene Wände gehen kann, wie durch das Aluminiumfenster in den soeben beschriebenen Versuchen, ohne zur Erde abzufließen, dies war vollkommen neu; es wäre aus alter Erfahrung nur das Gegenteil vorauszusagen gewesen. Es liegen hier, bei der dichten Packung der Atome im festen Metall, unzweifelhaft die schon bei Gasen nachgewiesenen Atomdurchquerungen vor (444), die aber nun um so bemerkenswerter erscheinen, als es freie Elektrizität ist, die mit den Strahlen die Atome durchsetzt.

457. Ladungsmessung mit dem Paraffinkondensator. — Man kann eine Ladungsmessung der Kathodenstrahlen in freier Luft trotz der hinderlichen Leitfähigkeit der Luft ausführen, wenn man die auffangende, mit dem Elektroskop oder Elektrometer zu verbindende Metallplatte M (Abb. 107) mit einer dünnen, durchstrahlbaren Isolatorschicht P überzieht, die dann noch mit einer ebenfalls dünnen Aluminiumfolie Al bedeckt wird, um jede Mitwirkung der leitenden Luft auszuschließen. Diese Aluminiumfolie schließt sich leitend an das mit der Erde verbundene Metallgehäuse des Ganzen an, welches jede Täuschung durch fremde elektrische Kräfte fernhält. Die von der Aluminiumseite her auffallenden Strahlen dringen bis in die Metallplatte M, wo sie vollständig absorbiert werden und ihre Ladung abgeben, die dann am Elektrometer zur Messung kommt.

Als Isolatorschicht eignet sich, dünnst auf die Platte M aufgetragen, Paraffin. Zwar wird auch dieser Isolator merklich leitend während der Durchstrahlung, wodurch die Messung etwas erschwert wird; aber man hat in diesem Kondensator das einfachste Mittel zum Nachweis der Ladung der Kathodenstrahlen, sowie zur Untersuchung irgendwelcher sonstiger Strahlung auf Ladung.

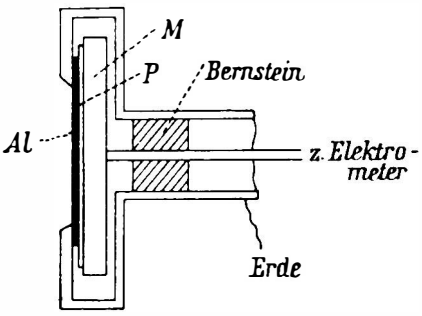


Abb. 107. Paraffinkondensator für Kathodenstrahlen.

458. Die Elektronen (1898). — Nach der gesicherten Feststellung der Ladung der Kathodenstrahlen (456) und den alsbald folgenden eingehenden Untersuchungen über ihre Geschwindigkeit

(460, 463) war kaum mehr ein Anlaß, zu bezweifeln, daß in diesen Strahlen in der Tat die als Jonenladungen der Elektrolyse schon betrachteten Elementarquanten der Elektrizität — und zwar der negativen — frei, abgesondert von Atomen, vorliegen (454).

Die Elektrizität an sich — wenigstens die negative —, ohne Materie, ist demnach hier entdeckt. Sie ist zugleich auf ihren Wegen durchs Vakuum verfolgbar und in ihren Eigenschaften weiter ergründbar geworden, während man bis dahin nur elektrisierte Körper und Leiter mit elektrischen Strömen kannte, ohne zu wissen, ob die Elektrizität überhaupt etwas Bestehendes, von den Leitern Abtrennbares ist, — mehr als nur eine schließlich wieder zu verlassende Hilfsvorstellung, wie der Magnetismus (232).

Wir haben diese Erkenntnis und das Wesentlichste ihrer weiteren Entwickelung wegen ihrer durchgreifenden Wichtigkeit schon von Anfang eingeführt, ebenso auch den für die freien Elementarquanten der negativen Elektrizität in Gebrauch gekommenen Namen „Elektronen" (1, 2, 12).

Die positive Elektrizität, die dann gleichfalls als etwas für sich Bestehendes anzusehen ist, ist erst später weiter untersuchbar geworden (siehe 533).

Mit dieser Erfassung der Elementarquanten der negativen Elektrizität, der Elektronen, in den Kathodenstrahlen wurde das aus den Ablenkungen schon gemessene Verhältnis e/m von Ladung zu Masse der Strahlen (454) eine Größe von grundlegender Wichtigkeit, und es folgten fortgesetzte Versuche zu möglichst genauer Feststellung der Größe dieses Verhältnisses. Die Steigerung der Genauigkeit war schwierig, im wesentlichen deshalb, weil scharf begrenzte magnetische und elektrische Felder (wie in 454 angenommen), nicht herstellbar sind, so daß für die Übergangsstellen oder für sonstige Feldungleichheiten noch besondere Messungen und Korrektionsrechnungen durchgeführt und auch Umwege aufgesucht werden mußten; weiter Neues bietet die Überwindung dieser Schwierigkeiten nicht. Wir gehen auf die Ergebnisse, besonders bei sehr schnellen Strahlen, später ein (478 u. f.). Bei nicht zu schnellen Strahlen ergab sich

$$e/m = 1{\cdot}7 \cdot 10^8 \text{ Coulomb/gr} \quad \text{(vgl. 479)}.$$

Die weitere Untersuchung der Kathodenstrahlen hat sehr eingehende Kenntnis auch der sonstigen Eigenschaften der Elektronen, ihres Verhaltens unter verschiedenen Umständen, besonders auch der Materie gegenüber, gebracht (487 u. f.) sowie Kenntnis verschiedener Mittel zu ihrer Befreiung aus der Materie, aus welcher sie ohne Zweifel auch in der Entladungsröhre kommen (466, 476, 493, 511). Damit wurden auch technische Anwendungen möglich, die nun schon in großem Maßstabe üblich geworden sind (477).

Die Art des Vorhandenseins der Elektronen in den Kathodenstrahlen ist übrigens durch die bisher betrachteten Beobachtungen nicht festgestellt; dieselben zeigen nicht, ob die Raumelemente der Strahlen (454, Abb. 105a) stetig oder unterteilt von der Elektrizität erfüllt sind. Doch sind andere Beobachtungen vorhanden, welche in den Strahlen dieselbe Unterteilung in Elementarquanten nachweisen, die man von den Jonen der Elektrolyten her kennt. So bei der Absorption der Strahlen in Gasen mit schließlicher Träger-

bildung (455, 505) und bei der Sekundärstrahlung (494), wo stets nur die Elementarquanten bestimmter Größe zu finden waren (194, 514). Man hat außerdem Bahnen einzelner Elementarquanten, somit Elementarstrahlen kleinster Elektrizitätsmenge, nachweisen und verfolgen können (516). Auch war bei Strahlen geringster Intensität die ungehinderte gegenseitige Durchdringung zweier, denselben Raum erfüllender, entgegengesetzt gerichteter Strahlenbündel festzustellen. Dies alles berechtigt dazu, Kathodenstrahlen stets aus einzelnen bewegten Elektronen zusammengesetzt zu betrachten. Dementsprechend ist das gefundene Verhältnis e/m von Ladung zu Masse im Strahlraum gleichzusetzen dem Verhältnis von Ladung zu Masse des Elektrons, $e/m = e/m$.

Da die Ladung des Elektrons aus Kenntnis der Elektrolyse und der Gastheorie bekannt und später durch Messungen an Elektrizitätsträgern in Gasen mit besonderer Genauigkeit weiter festgestellt ist (194),

$$e = 16 \cdot 10^{-20} \text{ Coulomb},$$

kann nun mit Hinzunahme der Kenntnis des Verhältnisses $e/m = e/m$ auch die Masse des Elektrons angegeben werden; sie ist

$$m = e \cdot \frac{m}{e} = 0{\cdot}9 \cdot 10^{-27} \text{ gr}.$$

Dies ist die kleinste bekannte Masse, $^1/_{1800}$ der Masse des Wasserstoffatoms (vgl. Tab. 45, 195, Bd. III).

459. Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit. — Es war schon von den frühen Beobachtungen in Entladungsröhren (441) bekannt, daß bei verschiedenen Gasdrucken Kathodenstrahlen verschieden starker magnetischer Ablenkbarkeit entstehen. Je geringer der Gasdruck, desto geringer auch die Ablenkbarkeit. Es ändert sich aber mit dem Gasdruck auch die elektrische Spannung, welche zur Hervorbringung der Entladung erforderlich ist, und zwar ist in diesem Bereich schon sehr hoher Gasverdünnungen bei geringerem Druck höhere Spannung erforderlich. Man kann daher auch sagen: je höher die Erzeugungsspannung, desto geringer die Ablenkbarkeit der Strahlen.

Reine Versuche außerhalb des Erzeugungsrohres zeigten bei Messung von e/m und v (453, 454), daß die Verschiedenheiten der Strahlen in ihrer Geschwindigkeit liegen; je höher die Erzeugungsspannung, desto höher ist auch die Geschwindigkeit der Strahlen. Man versteht leicht, und die Gleichungen 454a und b zeigen es quantitativ, daß mit steigender Geschwindigkeit die magnetische und auch die elektrische Ablenkbarkeit abnehmen muß. Es zeigte sich, daß auch die Absorption und die Diffusion mit steigender Geschwindigkeit abnehmen.

Man sieht, daß die bisher betrachteten Kathodenstrahlen von $^1/_3$ Lichtgeschwindigkeit (454) nur ein Sonderfall sind, entsprechend den gewählten Erzeugungsbedingungen (442). Es werden im weiter Folgenden die Eigenschaften der Strahlen aller möglichen verschiedenen Geschwindigkeiten zu betrachten sein (475—502).

460. Abänderung der Geschwindigkeit der Strahlen. — Mit dem in Abb. 108 dargestellten Apparat konnte gezeigt werden (1898), daß Kathodenstrahlen gegebener Geschwindigkeit auf andere Geschwindigkeiten gebracht werden können, wenn man sie parallel zu den Kraftlinien eines elektrischen Feldes laufen läßt. Sie verhalten sich auch hierbei ganz wie elektrisch geladene, bewegte Massen.

E ist das Erzeugungsrohr mit der Kathode K, durch die Fensterwand m m vom Beobachtungsraum B B getrennt. Dieser ist zum vollständigen Auspumpen eingerichtet; das Fenster F ist von außen ans Glasrohr des Beobachtungsraumes gekittet, um in diesem selbst möglichst keine Dämpfe zu haben. Die Strahlen gelangen durch zentrale Bohrungen der kreisförmigen Kondensatorplatten a und b ins elektrische Feld zwischen diesen Platten und wieder aus

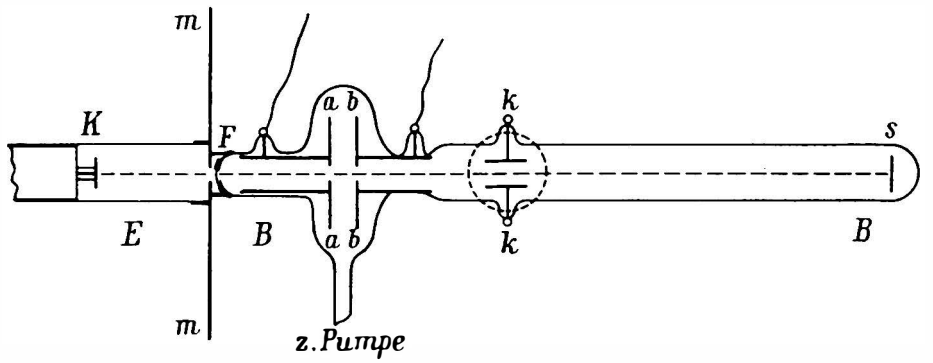


Abb. 108. Messung der magnetischen und elektrischen Ablenkung der Kathodenstrahlen vor und nach Geschwindigkeitsänderung in reinen Versuchen.

demselben heraus, dann weiter zwischen die Platten k k und schließlich auf den Schirm S, wo ihr Ende als Phosphoreszenzfleck sichtbar wird. Im Kondensator a b laufen die Strahlen parallel zu dessen elektrischen Kraftlinien; mittels k k kann ihre elektrische Ablenkbarkeit gemessen werden und mittels zweier Stromspulen vor und hinter der Röhre (in der Abbildung durch einen Kreis angedeutet) ihre magnetische Ablenkbarkeit. Beide Messungen zusammen ergeben ihre Geschwindigkeit, sowie auch das Verhältnis e/m (454). Man findet die Geschwindigkeit vergrößert, wenn b positiv gegen a geladen ist und verkleinert, wenn b negativ ist. Vom Fenster bis a und ebenso von b bis k k und S müssen die Strahlen in feldfreiem Raum laufen, damit sie nur durch das Feld a b allein beeinflußt sind; dazu schließen sich an a und b Metallrohre und weiter noch äußere (in der Abbildung nicht dargestellte) Metallhüllen, die die Spannung von a (Erde) bzw. b erhalten.

Es zeigte sich, daß die Geschwindigkeiten v_1 und v_2 der Strahlen vor und nach Durchsetzung des Kondensators a b, dessen Spannung V ist, der Gleichung folgen

$$\tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2 = eV \quad \text{oder} \quad v_2^2 - v_1^2 = 2\frac{e}{m}V, \qquad 460)$$

d. h. daß die Änderung der kinetischen Energie $\frac{1}{2}mv^2$ der Massen des Strahles gleich ist der im Feld an diesen Massen infolge ihrer Ladung geleisteten Arbeit eV (119), ganz wie es der einfachsten Anwendung des Energiegesetzes auf irgendwelche geladene Massen entspricht.

Man sieht, daß hier wieder nur das Verhältnis e/m maßgebend ist, nicht Ladung oder Masse einzeln. Wir haben dies Verhältnis hier unabhängig von der Geschwindigkeit v angenommen; auf die bei schnellsten Strahlen und verfeinerter Messung merklich werdende Veränderlichkeit des Verhältnisses gehen wir später ein (479). Langsamste Strahlen (lichtelektrisch erzeugt, 466) haben sich ganz nach Gl. 460 verhalten; im besonderen zeigte sich, daß sie durch entsprechende Gegenspannungen zum Stillstand und zur Umkehr gebracht werden können (468).

461. Ursprungsort der Kathodenstrahlen ist die Kathodenoberfläche. — Über die Entstehung der Kathodenstrahlen in der Entladungröhre kann aus der Erkenntnis der Natur der Strahlen nur geschlossen werden, daß die Entladung irgendwie Elektronen zur Verfügung stellen muß, die im elektrischen Felde zwischen Kathode und Anode ihre von der Kathode weg gerichtete Geschwindigkeit erhalten, die sie dann auch abgesondert vom Kraftfeld als Kathodenstrahlen zeigen. Besondere Messungen ergaben, daß bei geerdeter Anode die Geschwindigkeit v der erzeugten Kathodenstrahlen der ganzen zwischen den Elektroden vorhandenen Spannung V entspricht nach der Gleichung $\frac{1}{2}mv^2 = eV$. Dies bedeutet aber (460), daß die Elektronen ihre beschleunigte Bewegung von der Ruhe aus nicht irgendwo im Gasraum des Rohres begonnen haben, sondern an der Oberfläche der Kathode, so daß sie also an dieser Oberfläche frei geworden sein müssen. Denn nur von dort ab ist die volle, an die Elektroden gelegte Spannung zur Verfügung (32). Damit stimmt es auch, daß die Strahlen nahe senkrecht von der Kathodenoberfläche ausgehen (440), denn dies ist die Richtung der elektrischen Kraft an der geladenen Oberfläche (70), und zwar wird in nächster Umgebung der Kathode auch das größte Spannungsgefälle gefunden, so daß die Strahlen schon dort den Hauptteil ihrer Geschwindigkeit nach Größe und Richtung erhalten. Sie werden dann in den schwächeren Feldern der weiteren Umgebung nur mehr wenig abgelenkt, weshalb die Lage der Anode in der Hauptsache gleichgültig ist (441). Welches der Vorgang der Elektronenbefreiung an der Kathodenoberfläche ist, hat erst spätere Erfahrung gezeigt (513).

462. Voltmaß der Elektronengeschwindigkeit. — Wenn ein Elektron von der Ruhe aus durch eine gegebene Spannung V beschleunigt wird, so nimmt es nach der gemachten Erfahrung (460) eine bestimmte Geschwindigkeit v an. Dementsprechend kann man als Maß von Elektronengeschwindigkeit an Stelle von v in cm/sek oder in Teilen der Lichtgeschwindigkeit ebensogut die erzeugende Spannung V in Volt angeben, was für viele Fälle zweckmäßig ist.

Der Zusammenhang von V mit v ist für alle Fälle durch das Energiegesetz gegeben, wonach die Beschleunigungsarbeit eV gleich der kinetischen Energie des Elektrons sein muß. Man sieht, daß durch V, bei der Unveränderlichkeit von e, die kinetische Energie des Elektrons bemessen ist. Für nicht große Geschwindigkeiten ist dieselbe $mv^2/2$, wie im Vorigen angenommen, so daß das Voltmaß V proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit v ausfällt. Dies gilt aber wegen der Masse der Energie (434) um so weniger genau, je größer die Geschwindigkeit ist, was noch eingehend zu behandeln ist (479). Dies ist bei Berechnung der in Tab. 53 zur Übersicht zusammengestellten Angaben von v und V bereits berücksichtigt[1]). Man interpoliert z. B. aus der Tabelle, daß Strahlen von 1/3 Lichtgeschwindigkeit rund 30000 Voltstrahlen sind.

[1]) Siehe die Berechnung im Anhang E VI, b und c.

Tab. 53. **Kathodenstrahlgeschwindigkeiten in Teilen der Lichtgeschwindigkeit (v) und in Volt (V).**

v	V
0	0
0·005	6·37
0·01	25·5
0·05	637
0·1	2 560
0·2	10 500
0·3	24 700
0·4	46 500
0·5	79 100
0·6	128 000
0·7	203 000
0·8	342 000
0·9	662 000
0·95	1 130 000
1	∞

463. Direkte Geschwindigkeitsmessung der Kathodenstrahlen. — Mit Benutzung schneller elektrischer Schwingungen, deren Ströme in sehr kurzen Zeiten wechselnde magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen geben, gelang es, die kurzen Zeiten zu messen, die zu ebenfalls meßbaren Wegen der Kathodenstrahlen gehören, und damit ihre Geschwindigkeit unmittelbar aus Weg und Zeit zu erhalten.

Die Übereinstimmung mit der Geschwindigkeitsberechnung aus elektrischen und magnetischen Ablenkungsmessungen (454) bedeutet eine bestätigende Prüfung der Kenntnis über die Kathodenstrahlen, über das Elektron und seine Eigenschaften (1898).

464. Kathodenstrahlen als Äthervorgänge. — Man kann nach der erlangten Kenntnis einen Kathodenstrahl in derselben Weise durch elektrische und magnetische Kraftlinien darstellen, wie es für den Lichtstrahl in Abb. 94 schematisch geschehen ist. Abb. 109 zeigt dies.

Das Elektron e ist das Ende der von oben kommenden elektrischen Kraftlinie, die hier als Vertreter einer Anzahl von Kraftlinien gezeichnet ist, die am Elektron enden[1]). Diese Kraftlinie steht nahe senkrecht zur Bewegungsrichtung v des Elektrons; denn wenn auch das ruhende Elektron ein allseitig gleichförmiges elektrisches Feld haben mag, so daß die zu ihm gehörigen Kraftlinien nach allen Richtungen gleichverteilt von ihm divergieren, so muß doch eine Umgruppierung der Kraftlinien eintreten, sobald das Elektron eine erhebliche, der Lichtgeschwindigkeit nahekommende Geschwindigkeit erhält, wie in einem schnellen Kathodenstrahl. Denn wir sahen, daß das gegenseitige Drängen der Kraftlinien fehlt, wenn sie Querbewegung mit Lichtgeschwindigkeit haben (415). Das Drängen besteht unvermindert nur bei Kraftlinien, die mit der

[1]) Ob das einzelne Elektron die Einseitigkeit besitzt, welche durch das Vorhandensein nur einer Kraftlinie angezeigt wäre, weiß man nicht (76).

Bewegungsrichtung v parallel laufen; diese müssen daher aus allseitig gleichförmiger Verteilung auseinander weichen, sowohl vor als hinter dem Elektron, und wenn dasselbe nahe Lichtgeschwindigkeit hat, müssen alle Kraftlinien nahezu in die Ebene senkrecht zur Bahnrichtung v sich begeben haben, wo sie einander bei der großen Geschwindigkeit nicht drängen. Es entsteht dann ein Kraftlinienbild, wie es Abb. 112c (482) für eine mit Lichtgeschwindigkeit bewegte elektrisch geladene Kugel zeigt (vgl. 482). Die in Abb. 109 gezeichnete einzelne Kraftlinie ist eine dieser vielen, scheibenförmig um die schnellbewegte Kugel verteilten Kraftlinien.

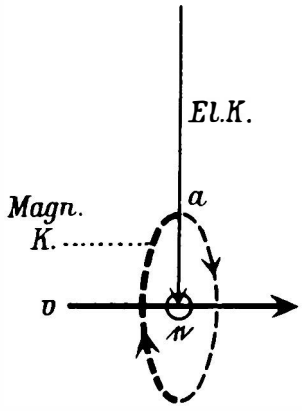


Abb. 109. Kathodenstrahl als Äthervorgang (Kraftlinienvorgang).

Die quer zu ihrer eigenen Richtung mit dem Elektron bewegte elektrische Kraftlinie erzeugt, dem elektrodynamischen Zusammenhang entsprechend (328), in der dritten Querrichtung magnetische Kraft, was durch die, beispielsweise vom Punkte a ausgehende, gestrichelt gezeichnete magnetische Kraftlinie angedeutet ist (der stärker gezeichnete Teil vorn befindlich zu denken); sie ist, wie alle magnetischen Kraftlinien, in sich geschlossen. Ein solches, die Elektronenbahn umkreisendes Magnetfeld muß vorhanden sein, weil eine bewegte Ladung gleich einem elektrischen Strom wirkt (297), womit übereinstimmend Ablenkung der Magnetnadel durch Kathodenstrahlen in der zu erwartenden Größe auch wirklich beobachtet werden konnte[1]).

Dieses Kraftfeld des Elektrons hat, wie alle Kraftlinien, Energieinhalt (122 u. f., 273 u. f.), und Energie hat Masse (434). Danach ist die zahlenmäßig festgestellte Masse des Elektrons, m (458), nicht notwendigerweise als etwas Besonderes anzusehen, sondern sie erscheint in einfachster Weise als Masse des Kraftlinienfeldes, welches das Elektron umgibt. Diese einfachste Auffassung entspricht nach aller vorhandenen Kenntnis auch der Wirklichkeit, worauf wir noch zurückkommen (480, 485, 583). Es ist danach ein verfehlter Wortausdruck, wenn man die Elektronen als negativ „geladene" Massen bezeichnet. Wohl verhalten sie sich wie solche; aber sie sind keine Massen, denen man die „Ladung" auch nehmen könnte. Denn die Masse, welche sie besitzen, wäre ohne die Ladung gar nicht vorhanden; sie ist die Masse des vom Elektron unzertrennlichen elektrischen Kraftfeldes. Danach ist es auch selbstverständlich, daß die Masse sich ändern kann, wenn bei Bewegung des Elektrons seine elektrischen Kraftlinien sich umgruppieren und außerdem das Magnetfeld hinzukommt, was auch noch eingehend zu betrachten sein wird (480, 482).

Man sieht, daß der Hauptunterschied zwischen dem Lichtstrahl und dem Kathodenstrahl — zwei Kraftlinienvorgängen im Äther — im Geschlossensein der elektrischen Kraftlinien beim ersteren, im Offensein

[1]) Verfeinerte Untersuchung der Kräfte in der Umgebung von Kathodenstrahlen müßte indessen — bei der Unbekanntschaft mit dem Felde des einzelnen Elektrons (vgl. 76, 304) — immer noch verfolgt werden.

beim zweiten besteht. Geschleuderte Energiemassen, verteilt in Kraftlinien, sind sie beide.

Das Einzigartige des Lichtstrahls, der elektromagnetischen Welle, ist es, daß sie immer diejenige Geschwindigkeit gegen den Äther des Ortes hat, bei welcher Drängen und Zug der querbewegten Kraftlinien Null sind (415). Der Kathodenstrahl dagegen kann beliebige Geschwindigkeiten unterhalb dieser besonderen Geschwindigkeit annehmen (460), und diese Möglichkeit ist durch seine offene elektrische Kraftlinie gegeben, die von ihrem anderen Ende her Kräfte in Geschwindigkeitsrichtung auf das Elektron übertragen kann.

Es sei hier bemerkt, daß die beiden Äthervorgänge, Licht und Kathodenstrahl, auch *natürgegebene Grundeinheiten für ein Einheitssystem* bieten, das noch weit mehr von Willkür frei wäre als das absolute CGS- oder QUS-System (262 u. f., 292): Die Lichtgeschwindigkeit als Geschwindigkeitseinheit und das Elektron als elektrische Mengeneinheit. Einen in solchem Einheitssystem weiter dienlichen, unmittelbar naturgegebenen Zusammenhang von Masse — und damit auch Energie (458) — mit Raum und Zeit enthält das Gravitationsgesetz (vgl. M 213).

Lichtelektrische Wirkung.

465. *Erste einfache Beobachtungen.* — Eine neue Erscheinung sehr einfacher Art wurde gefunden: eine blanke Metallplatte, ultraviolett belichtet, verliert negative Ladung in die Luft; positive bleibt erhalten; unelektrisch belichtet nimmt die Platte schwache positive Ladung an (Hallwachs, 1888[1]).

466. *Entstehung von Kathodenstrahlen durch Licht.* — Die Erscheinung wurde verständlich durch ihre Verfolgung in reinen Versuchen nach Erkenntnis der Natur der Kathodenstrahlen. Es war vor allem zu sehen, ob die Erscheinung auch ohne Luft, im *vollständigen Vakuum*, bestehen bleibt und, nachdem dies bejaht sich zeigte, welches das Verhalten der von dem belichteten Metall weggehenden negativen Elektrizität sei. Man fand, daß *die Elektrizität in Form sehr langsamer Kathodenstrahlen weggeht* (1899). Der Nachweis liegt in folgenden Beobachtungen. U in Abb. 110 ist die zu belichtende Platte, L die Lichtquelle. E ist eine in der Mitte durchbohrte Metallplatte; wird dieselbe positiv geladen, während U negativ ist, so werden die von U durch Wirkung des Lichtes ausgehenden, durch das Weitere nachgewiesenen Elektronen beschleunigt und treten mit entsprechend erhöhter Geschwindigkeit als Strahl durch die Öffnung von E. Der Strahl kann an einem Phosphoreszenzschirm beobachtet werden, wenn er schnell genug ist, um diesen zu erregen; in jedem Falle kann der Strahl an einer Platte a aufgefangen werden, die mit einem Elektrometer verbunden ist und so die Intensität des Strahls als negative Elektrizitätsmenge meßbar macht. Das Ganze ist im luftleer zu machenden Rohre ein-

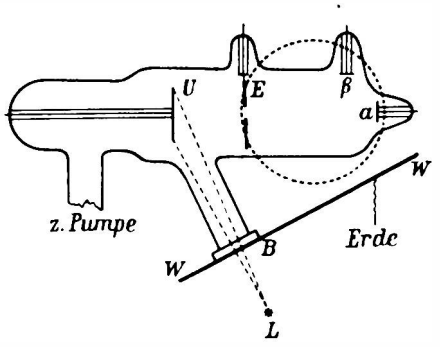


Abb. 110. Lichtelektrische Wirkung.

[1]) Verwickeltere Beobachtungen von H. Hertz hatten den Weg gezeigt.

geschlossen; der Quarzverschluß bei B läßt das Licht ein; der Metallschirm W W hält die elektrischen Kräfte der Lichtquelle — elektrischer Bogen oder Funken — ab.

Die Strahlen können durch magnetische Ablenkung untersucht werden, wozu die durch den punktierten Kreis (Abb. 110) angedeuteten Stromspulen beiderseits am Rohre angebracht sind. Eine Ablenkung bis zur Platte β ermöglicht die Ermittelung des Krümmungsradius, welchen die Strahlen in meßbarem Magnetfeld annehmen, aus geometrischen Abmessungen am Rohr. Da die Anfangsgeschwindigkeit, mit welcher die Strahlen die Platte U verlassen, sehr klein ist und besonders ermittelt werden kann (468), so ist für die Geschwindigkeit, mit welcher die Strahlen ins Magnetfeld gelangen, die zwischen U und E gelegte, beschleunigende Spannung maßgebend (460), und die Hinzunahme der magnetischen Messung ergibt sogleich das Verhältnis e/m von Menge zu Masse der von der belichteten Platte ins Vakuum gegangenen Elektrizität (Gl. 454a). Das Verhältnis zeigte sich von gleicher Größe wie bei den Kathodenstrahlen der Entladungsröhre (454), und dies ist der Nachweis dafür, daß hier *dieselben Elektronen* vorliegen wie bei diesen Kathodenstrahlen. Da die Elektronen aus den Atomen der belichteten Platte stammen, sind somit *Elektronen als Bestandteile der Atome* fast unmittelbar nachgewiesen (vgl. weiter 493), und dies gilt nicht nur für Metallatome (s. 470).

467. Die aus der belichteten Fläche in der Zeiteinheit *entweichende Elektrizitätsmenge* — die Anzahl der entweichenden Elektronen — ist *proportional der auffallenden Lichtintensität*. Darauf ist die „*lichtelektrische Photometrie*“ gegründet, welche Lichtintensitäten mittels Elektrometer und Uhr mißt. Extrem verschiedene Lichtintensitäten können so leicht und zuverlässig miteinander verglichen, äußerst schwache Intensitäten durch Verlängerung der Zeit noch gut gemessen werden. Doch müssen die zu vergleichenden Lichter gleiche Wellenlängen haben, wie bei der Photometrie mit dem Auge; verschiedene Wellenlängen wirken lichtelektrisch verschieden (471). Unter besonders günstigen Umständen kann die lichtelektrische Wirkung statt mit Elektrometer und Uhr auch mit Galvanometer gemessen werden, was unmittelbare Ablesbarkeit von Lichtintensitäten ermöglicht (470).

Die *Bildtelegraphie* („Fernsehen“) benutzt die große, das Auge noch übertreffende lichtelektrische Empfindlichkeit der Alkalimetalle (472), um Lichtverteilungen in (zeitliche) Verteilungen elektrischer Zeichen zu verwandeln, die dann an entfernter Stelle Kathodenstrahlen ergeben können, deren Phosphoreszenzwirkung wieder Lichtverteilungen hervorbringt.

468. Die *Anfangsgeschwindigkeiten*, mit welchen die Elektronen die belichtete Platte U (Abb. 110) verlassen, untersucht man am besten durch Messung der entweichenden Menge bei verzögernden Spannungen zwischen U und E, d. h. mit negativer Ladung auf E, positiver auf U. Man erreicht schon bei sehr geringen Spannungen völligen Stillstand des Entweichens, und dies beweist, daß die Anfangsgeschwindigkeiten *sehr klein* sind. Die eingehende Untersuchung zeigte außerdem, daß das *Entweichen der Elektronen diffus*, nach allen Richtungen von der Platte weg erfolgt. Gelangen die Elektronen dann in das verzögernde Feld zwischen U und E, so beschreiben sie Parabelbahnen, deren Scheitel aber bei genügender Größe der verzögernden Spannung schon vor E liegt, so daß sie E nicht erreichen, sondern umkehren

und wieder zu U zurückkommen, als wäre überhaupt nichts ausgestrahlt worden. Es sind das Bahnen gleich denen aufwärts geworfener Körper, die wieder zur Erde zurückgelangen.

Dieser Stillstand des Entweichens tritt schon bei einigen wenigen Volt verzögernder Spannung ein, und diese Spannung ist das Voltmaß für die Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen (460, 462). Doch zeigt sich, daß die Anfangsgeschwindigkeiten uneinheitlich sind; es liegt stets eine gewisse Geschwindigkeitsverteilung zwischen Null und einigen Volt vor.

Aus den kleinen Anfangsgeschwindigkeiten ist es verständlich, daß positiv geladene Körper keine lichtelektrische Wirkung zeigen (465); und die geringe positive Spannung, welche unelektrische, isolierte Körper bei der Belichtung annehmen, ist Folge anfänglichen Entweichens der Elektronen, mit Rückkehr derselben, sobald einige positive Spannung erreicht ist.

469. Sehr bemerkenswert ist es, daß die lichtelektrischen Anfangsgeschwindigkeiten unabhängig sind von der Intensität des wirkenden Lichtes. Intensiveres Licht erhöht zwar entsprechend die Menge der entweichenden Elektronen (467), ändert aber nicht die Geschwindigkeiten, mit welchen sie die belichtete Fläche verlassen; diese Geschwindigkeiten hängen nur von der Wellenlänge des wirkenden Lichtes ab. Das Unerwartete dieses Verhaltens zeigt, wie wenig die Vorgänge bei Wirkung von Licht auf Atome aus der Kenntnis der Vorgänge bei Wirkung von Wellen auf große Körper zum voraus verständlich sind. Zwar erscheint die lichtelektrische Wirkung als ein Abtrennungsvorgang von Elektronen aus Atomen des belichteten Körpers durch Wirkung des Lichtes (466); wie aber die bei der Abtrennung sich ergebenden Geschwindigkeiten der Elektronen so ganz unabhängig von der wirkenden Lichtenergie sein sollten, war zunächst nicht ersichtlich. Es liegt hier eine besondere Atomeigenschaft vor, die aus der Strahlung heißer Körper ersichtlich geworden ist (siehe 471).

470. Lichtelektrische Wirkung auf nichtmetallische Körper und auf Gase. — Es zeigten sich nicht nur die Metalle der lichtelektrischen Wirkung zugänglich, sondern auch Nichtleiter und auch Flüssigkeiten und Gase, z. B. die Luft. Bedingung für starke Wirkung ist aber stets starke Absorption des Lichtes im betreffenden Körper. So wirkt z. B. auf die Gase der Luft nur das sehr kurzwellige Ultraviolett, welches von derselben kräftig absorbiert wird (Flußspatviolett, siehe O 98 und Tab. 38, Bd. III). Längerwelliges Ultraviolett wirkt nur auf die oft der Luft beigemengten Dämpfe, die auch die längeren Wellen stark absorbieren, und gibt wegen der geringen Menge der Dämpfe nur wenig lichtelektrische Wirkung. Auch Hochfrequenzstrahlen geben lichtelektrische Wirkung in Gasen (473).

Die lichtelektrische Wirkung auf die Gase wird dadurch merklich, daß dieselben bei der Belichtung elektrisch leitend werden, was Folge der aus den Gasmolekülen durch das Licht befreiten Elektronen ist, was wir später gesondert betrachten (507).

Belichtet man eine auf einer Kupferplatte befindliche dünne Kupferoxydulschicht oder Selenschicht, so treten die in der Schicht lichtelektrisch freigemachten Elektronen ohne Hindernis ins Kupfer über und laden es negativ auf. Wird das Kupfer mit einem auf die Schicht gelegten Metallnetz leitend verbunden, so fließt bei dauernder Belichtung ein dauernder Strom im Der-

bindungsdraht. Der Strom kann durch höchstempfindliche Drehspulgalvanometer (319) mit Zeigerablesung gemessen werden, womit man ein Photometer mit unmittelbarer Anzeige von Lichtintensitäten hat (467).

471. Ursprung der Energie der lichtelektrischen Wirkung. — Die Notwendigkeit starker Absorption des Lichtes (470) zeigt an, daß die Arbeit zur Abtrennung des Elektrons vom Atome und auch die kinetische Energie der Anfangsgeschwindigkeit des Elektrons der Energie des absorbierten Lichtes entnommen sein könnten, was auch ganz der durch alle Erscheinungen der Optik angezeigten Auffassung der Lichtabsorption als eines Resonanzvorganges entspricht (O 85, 90, 92). Ein Resonanzvorgang, wie er von großen Massen her bekannt ist, würde aber bei vermehrter Energie der Wellen des Lichtes, d. i. bei vermehrter Lichtintensität, vergrößerte Anfangsgeschwindigkeiten erwarten lassen. Die demgegenüber festgestellte Unveränderlichkeit der Anfangsgeschwindigkeiten (469) zeigt, daß hier, wo die Resonanz in den Atomen stattfindet, Besonderes vorliegt. Man kann denken, und dies hat sich in allem folgenden bewährt, daß hier die schon bei der Ausstrahlung der heißen Körper nachgewiesene Besonderheit der Atome zur Geltung komme, Energieaustausch quantenmäßig zu bewirken (W 181), so daß die durch Resonanz im Atom aufgenommene Energie erst dann zur Ausstrahlung des Elektrons verwendet wird, wenn ihre Menge dem vollen Betrag des Quants hn der betreffenden Schwingungszahl n erreicht hat[1]). In diesem Fall sind die Anfangsgeschwindigkeiten nur von der Wellenlänge abhängig zu erwarten, wie es beobachtet wurde; stärkeres Licht bringt zwar mehr, nicht aber schnellere Elektronen zur Aussendung.

Die eingehende Untersuchung der lichtelektrischen Wirkung mit monochromatischem Lichte verschiedener Wellenlängen hat in der Tat gezeigt, daß die Anfangsgeschwindigkeiten mit abnehmender Wellenlänge steigen, und zwar so, wie es der Herkunft sowohl der Anfangsgeschwindigkeit V_0 als auch der Abtrennungsarbeit aus der Energie des vom Atom aufgenommenen Energiequants hn entspricht, so daß

$$hn = e \cdot V_0 + \Pi . \qquad 471)$$

Hierbei ist n die Schwingungszahl des vom Atom absorbierten Lichtes, h das schon in der Wärmelehre aufgetretene konstante „Wirkungsquant" (W 180), eV_0 die zur Hervorbringung der beobachtbaren Anfangsgeschwindigkeit V_0 erforderliche Arbeit (462) und Π die Arbeit zur Abtrennung des Elektrons vom Atom samt der zum Austritt des freien Elektrons aus dem festen oder flüssigen Körper noch erforderlichen Arbeitsleistung gegen die Anziehung des im Körper zurückbleibenden positiven Elementarquants[2]).

Das Hinzukommen des Summanden Π zeigt sich dadurch an, daß bei zu langen Wellen, d. i. bei zu kleinen Quanten hn, die lichtelektrische Wirkung fehlt. Es ist dann $hn < \Pi$, das Energiequant nicht ausreichend zur Abtrennung des

[1]) In den Wellenzügen des Lichtes hat sich keine Quantenunterteilung der Energie gezeigt; wir haben darauf eingehend in der Optik, beim Nachweis der kohärenten Wellenzüge und der breiten Wellenfronten des Lichtes hingewiesen (O 129, 161, W 182).

[2]) Da hn in erg bemessen ist, müssen in Gl. 471 auch e, V_0 und Π in CGS-Einheiten eingesetzt werden (V_0 in Spannungsmaß).

Elektrons. Bei einer gewissen Grenzwellenlänge $\lambda_0 = c/n_0$ wäre eben noch $hn_0 = \Pi$, wobei $V_0 = 0$ ist; das Elektron kann abgetrennt zum Austritt gebracht werden, hat aber keine Anfangsgeschwindigkeit. Dies ist die größte eben noch wirksame Wellenlänge. Hierin liegt auch die Erklärung dafür, daß die lichtelektrische Wirkung vorzugsweise dem kurzwelligen Licht, dem Ultraviolett zugehört. Die Abtrennungsarbeit Π zeigt sich, in Spannungsmaß angegeben (462), nur nach einzelnen Volt bemessen.

Dieser quantitative Zusammenhang von Wellenlänge und Anfangsgeschwindigkeit entspricht soweit der Wirklichkeit, als es bei der Uneinheitlichkeit der Anfangsgeschwindigkeiten (468) nachprüfbar ist, und dies zeigt an, daß der Ursprung der Energie der lichtelektrischen Elektronen aus dem Licht in der Hauptsache richtig erkannt ist.

Erstaunlich bleibt es immer, daß kein bisher merklich gewordener Teil dieser Energie aus dem durch die radioaktiven Erscheinungen nachgewiesenen, sehr reichen Energievorrat des Atoms stammt, welches das Elektron geliefert hat. Man kann denken, daß die lichtelektrisch abtrennbaren Elektronen dem Äußeren der Atome angehören, während die größten Energievorräte des Atoms in seinem Inneren konzentriert sind (vgl. 556). Lichtelektrisch abtrennbare und Valenz-Elektronen der Atome (182) dürften in den meisten Fällen identisch sein; denn die gute lichtelektrische Wirksamkeit der reinen Metalle verschwindet in deren Verbindungen, wo die Valenzelektronen festgehalten sind. Hiermit stimmt auch der Zusammenhang der lichtelektrischen Wirksamkeit der Metalle mit der Spannungsreihe (472).

472. Abtrennungsarbeit und Spannungsreihe. — Es ist zu denken, daß die Arbeit zur Abtrennung des Elektrons bei verschiedenen Atomen verschieden und zwar um so kleiner sein wird, die Grenzwellenlänge λ_0 (471) also um so größer, je leichter die Atome auch bei anderen Anlässen Elektronen verlieren, d. i. je näher sie dem positiven Ende von Voltas Spannungsreihe stehen (136, 183). Dies trifft auch zu. Zink und noch mehr Aluminium, am meisten die Alkalimetalle sind die vorzugsweise lichtelektrisch wirksamen Stoffe. Rubidium und Zäsium sind sogar bis ins Ultrarot empfindlich. Dieser Zusammenhang mit Voltas Spannungsreihe befestigt auch die im ganzen noch geringe Kenntnis vom Zusammenwirken der Elektronen und Atome in den festen Metallen (138).

473. Lichtelektrische Wirkung kürzester Wellen. — Auch die kürzesten bekannten Wellen, Hochfrequenzstrahlen und γ-Strahlen (499, 552, vgl. die Wellenskale Abb. 95) zeigen lichtelektrische Wirkung, und zwar mit Anfangsgeschwindigkeiten, die, entsprechend den großen Energiequanten, sehr hoch sind (Gl. 471). Die Abtrennungsarbeit macht infolgedessen hier wenig aus, so daß fast die Gleichung $hn = e \cdot V_0$ gilt. Für $\lambda = 0{\cdot}00000004\,\text{mm} = 0{\cdot}04\,\mu\mu$ also $n = \frac{3}{4} \cdot 10^{19}$/sek, wird $V_0 = 30000$ Volt; man erhält also ganz schnelle Kathodenstrahlen durch Wirkung so kurzer, absorbierter Wellen.

Wenn in so kurzwelliger Strahlung von deren Erzeugung her gesonderte Energiequanten (Wellenzüge) vorhanden sind (552, O 165), so kommt es vor, daß das einfallende Energiequant bei der Befreiung des Elektrons nicht ganz verbraucht wird, sondern daß ein Rest des Energiequants als entweichender Wellenzug übrig bleibt, dessen Wellenlänge dann seinem Energieinhalt entsprechend (quantenmäßig) vergrößert ist (wie bei Fluoreszenz, s. O 106). Sehr bemerkenswert ist es dabei, daß die Richtungen des einfallenden Wellenzugs, des entweichenden Wellenzugs und des entweichenden Elektrons, sowie die Wellenlängenänderung und die Geschwindigkeit des Elektrons so miteinander zusammenhängend gefunden sind, wie es nach einfachster Möglichkeit bei Wirkung nur innerer Kräfte (M 217) auf die beteiligten Energiemassen (435) der Wellenzüge und des Elektrons bei der besagten Umwandlung zu erwarten ist

(„Compton-Effekt"). Das Besondere ist hierbei nicht die auch sonst (436, 481) erprobte Geltung der allgemeinen Gesetze (wie Energiegesetz, Schwerpunktssatz) für alle, auch nichtmaterielle Massen. Sondern es scheint hier ein wohl bisher einfachster Fall vorzuliegen der Neuentstehung eines Wellenzuges, mit abgeänderter Wellenlänge, aus einem alten unter Vermittlung nur eines einzelnen Elektrons, nicht eines ganzen Atoms[1]). Die neue Wellenlänge ist hierbei ebenso quantenmäßig bestimmt, wie bei den weniger einfach erscheinenden Vorgängen in ganzen Atomen (W 181). Der Unterschied liegt aber darin, daß hier keine Eigenperiodenzahlen eines Atoms bestimmend sind (vgl. Fluoreszenz, O 106), sondern nur die Schwingungszahl des einfallenden Wellenzugs, die Masse des Elektrons und die Art des Auftreffens des Wellenzuges auf das Elektron nach Maßgabe jener allgemeinen Gesetze. Einzelheiten des Wellenumwandlungsvorgangs sind allerdings auch bei dem betrachteten einfachen Fall verborgen geblieben.

474. Lichtelektrische Wirkung in gaserfülltem Raum. — Alle diese wesentlichen Auskünfte über die lichtelektrische Wirkung sind im gasfreien Raum gewonnen worden. Ist Gas vorhanden, so kommt man auf die ursprünglich beobachteten Erscheinungen zurück, an denen die lichtelektrische Wirkung zuerst studiert wurde (465). Diese Erscheinungen verstehen sich nun vollkommen aus dem Zusammenwirken der lichtelektrisch freigemachten Elektronen mit den Gasmolekülen, worauf wir in allgemeinerem Zusammenhang eingehen werden (509).

Langsame Elektronen.

475. Die lichtelektrische Wirkung hat zum erstenmal Elektronen beliebig geringer Geschwindigkeit, langsamste Kathodenstrahlen, die im Entladungsrohr nicht erzeugt werden können, und zwar unmittelbar im Vakuum entstehend, zur Verfügung gestellt, so daß deren Verhalten im Vergleich zu dem der schnellen Elektronen der älter bekannten Kathodenstrahlen in reinen Versuchen studiert werden konnte.

Einen Teil der Ergebnisse, das Verhalten der Elektronen Atomen gegenüber betreffend, werden wir in allgemeinem Zusammenhange gesondert betrachten (487—497). Der andere Teil lehrte das Verhalten der langsamen Elektronen im Vakuum kennen, in elektrischen und magnetischen Feldern, und zeigte ihre Lenkbarkeit durch schwächste Kräfte. Obgleich hierbei grundlegend nichts Neues hervortrat — denn das Verhalten war ganz das nach der Kenntnis der schnelleren Kathodenstrahlen zu erwartende (458, 460, 466), wie es Ladungen von so kleiner Masse bei kleiner Geschwindigkeit entspricht —, so waren doch damit für gewisse Anwendungen ganz neue Möglichkeiten eingehend vorgeführt. Hierauf und auf eine besonders den Anwendungen günstige neue Erzeugungsweise langsamster Strahlen gehen wir im zunächst folgenden ein (476, 477).

476. Glühelektrische Wirkung. — Sie besteht im Freiwerden von Elektronen aus heißen festen oder flüssigen Körpern.

Daß glühende Körper die Luft in ihrer Umgebung elektrisch leitend machen, war lange bekannt; aber es war erst spät möglich geworden, dieser Erscheinung näher zu kommen. Man konnte nicht entscheiden, welchen Anteil dabei die heiß gewordene Luft hat — deren Leitvermögen auch schon lange bekannt war (4) —,

[1]) Doch ist der Effekt bisher an freien Elektronen nicht beobachtet worden. Es könnte daher sein, daß die Mitwirkung der Atome des bestrahlten Körpers doch nicht unwesentlich ist, und daß der Mangel an äußeren Kräften nur durch die oben schon vermerkte relative Geringfügigkeit der Abtrennungsarbeit vorgetäuscht ist.

und ob etwa der glühende feste Körper auch an sich eine besondere Wirkung hat; man konnte nicht erfahren, wie die heißen Körper für sich allein, im Vakuum, sich verhalten. Keine Versuche, die allein Aufschluß geben konnten, waren verhindert durch den Umstand, daß glühende Körper wie Platindrähte, Kohlefäden, fortwährend Gas aus ihrem Inneren abgeben und somit das Vakuum verderben, solange bis sie endlich selber ganz verflüchtigt und an die Gefäßwände sublimiert sind. Erst Wolfram, erprobt in den zur Beleuchtung dienenden Glühlampen, gab die Möglichkeit des Glühens im Vakuum ohne störende Gasabgabe. Es zeigte sich dann, daß vom heißen Metall langsame Elektronen ausgehen, wie bei der lichtelektrischen Wirkung, daß also *hohe Temperatur ebenso wirkt wie ultraviolette Belichtung*. Dies ist der Grundvorgang, aus dessen Kenntnis auch die Vorgänge im Gasraum folgen, wie bei der lichtelektrischen Wirkung (vgl. 474).

Die Anfangsgeschwindigkeiten der Elektronen sind auch hier allseitig gerichtet und uneinheitlich (vgl. 468); sie steigen, so wie auch die entweichenden Elektronenzahlen, mit steigender Temperatur. Unterhalb einer gewissen Temperatur (Rotglut bei Wolfram) findet kaum spurenweises Entweichen statt.

Soweit bisher zu sehen, ist dies alles nahezu so, als wäre der Körper kalt und von dem Lichte getroffen, das er selber ausstrahlt. Jedoch können durch Glühen leicht außerordentlich viel mehr Elektronen zum Entweichen gebracht werden als durch gut erreichbare Belichtungsintensitäten.

Dünne Überzüge von Oxyden, besonders der Erdalkalimetalle, auf dem Glühdraht verstärken sehr seine Elektronenabgabe.

Man verwendet die glühelektrische Wirkung auch zur Erzeugung schneller Kathodenstrahlen, indem die kalte Kathode der alten Entladungsröhre (440) durch einen Glühdraht ersetzt und genügend hohe beschleunigende Spannung ans Rohr gelegt wird. Die Erzeugung erfolgt dann im vollständigen Vakuum; sie ist viel zuverlässiger als in der Entladungsröhre mit Gasrest, und man erhält leicht ununterbrochen andauernde Strahlung (vgl. 513).

477. *Technische Anwendungen.* — Ausgiebige Anwendung im großen finden langsame Elektronen 1. *zur Gleichrichtung von Wechselströmen*, 2. *zur Verstärkung sehr schwacher Wechselströme* und 3. *zur Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen*.

Alle drei Anwendungen können im wesentlichen an Abb. 111 erläutert werden. R R ist im Querschnitt das luftleere Rohr mit dem Glühdraht U; k ist die Stromquelle für sein Glühen. A ist eine kalte Metallplatte, die als Anode dient. E, sowie alle anderen Teile der Abbildung fallen für die erstgenannte *Anwendung, als Gleichrichter*, weg. Schaltet man eine Wechselstromquelle zwischen U und A, so kann nur der von A nach U hin gerichtete Anteil des Wechselstroms durchgehen. Denn es sind im materiefreien Raume der Röhre nur freie Elektronen zum Elektrizitätstransport vorhanden und diese gehen nur von der heißen Elektrode U aus; die kalte Elektrode A kann wohl Elektronen aufnehmen, aber keine ausgeben. Eine von U nach A gerichtete Spannung kann daher nur die Elektronen von U zurückhalten (460), aber keinen Stromdurchgang bewirken. In dieser Weise wirkt die Röhre nur als einseitig durchlassendes Ventil. Um den vollständigen Gleichrichter zu haben, der auch den entgegengesetzt gerichteten Strom zur Verwendung bringt, können zwei (für Drehstrom drei) Anoden A an derselben Röhre angebracht und auch Drosselspulen (389) zur Hilfe genommen werden. Da der Strom in der Röhre ganz von Elektronen getragen wird, ist zur Gleichrichtung starker Ströme eine entsprechend reiche Elektronenquelle nötig. Es tritt dann als solche an Stelle des Glühdrahtes eine Quecksilberoberfläche, die durch Bogenentladung (219) in der Röhre mittels des gleichgerichteten Stromes selber ständig auf hoher Temperatur gehalten wird, dadurch reichlich verdampft und vom heißen Dampf Elektronen abgibt (vgl. 510, 513; „Quecksilbergleichrichter“). Der die Röhre dann erfüllende, an den kalten Teilen übrigens wieder sich verflüssigende Quecksilberdampf

ſtört nicht; er wirkt ſogar günſtig, da die Queckſilberatome poſitive Ladung haben, ſo daß die Kraftlinien der freien Elektronen an ihnen kurz enden können und kein Kraftfeld erzeugen, das die notwendige ſtarke Häufung freier Elektronen im Raum der Röhre verhindern müßte.

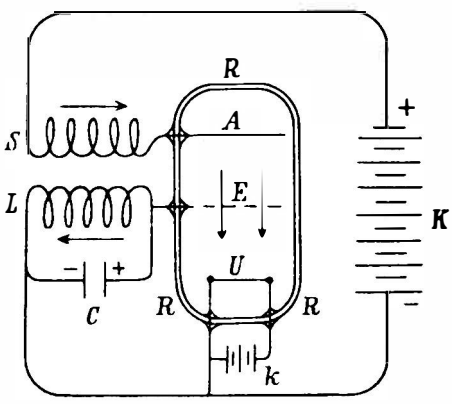


Abb. 111. Elektronen-Röhre als Gleichrichter, Verſtärker, Erreger ungedämpfter Schwingungen.

In der Verſtärkerröhre, zur zweitgenannten Anwendung der langſamen Elektronen, iſt das Netz oder Gitter E (Abb. 111) wichtig, und es kommt noch die Stromquelle K hinzu, welche die Energie für die Verſtärkung zu liefern hat und deren poſitives Ende mit A zu verbinden iſt. Die Teile S, L und C fallen hier weg. Die zu verſtärkende Wechſelſpannung, die z. B. im Telefon nicht gut hörbar wäre, iſt zwiſchen E und U zu ſchalten; der verſtärkte Strom gleichen Wechſels läuft dann zwiſchen A und U und über K. Innerhalb der Röhre iſt dieſer Strom ganz von den Elektronen getragen, die von U ſtammend bis A kommen. Die Menge dieſer Elektronen und damit die Stromſtärke kann groß ſein; ſie wechſelt aber ganz ſo, wie die Spannung UE. Denn iſt dieſelbe beſchleunigend, ſo gelangen viel Elektronen durch das Gitter E bis A, iſt ſie verzögernd, wenige oder gar keine. Das Gitter E wirkt hier in derſelben Weiſe wie die Lochplatte E in Abb. 110 bei der Unterſuchung der lichtelektriſchen Wirkung (468), und wir haben dort die Bahnen der Elektronen zwiſchen U und E ſchon betrachtet.

Die drittgenannte Anwendung langſamer Elektronen, zur Hervorbringung *ungedämpfter elektriſcher Schwingungen* und dementſprechend *ununterbrochen laufender Wellenzüge* iſt an ſich ein bemerkenswerter Fortſchritt. Die durch Funkenentladung ſtoßweiſe ausgelöſten Schwingungen und ihre Wellen (395 u. f.) brachten reiche Aufklärung; verglichen mit den Luftwellen eines dauernden Tones, wie ſie beiſpielsweiſe eine Pfeife gibt, ſind ſie aber dürftig wie die Wellen eines Paukenſchlages, der immer wieder erneuert werden muß und immer wieder ſchnell verklingt (vgl. 396). Die hier vorliegende Frage der nicht ſtoßweiſen, ſondern dauernden Energiezufuhr zum Oſzillator wird durch die langſamen Kathodenſtrahlen in naturgemäßer Weiſe gelöſt. So wie in der Pfeife der ununterbrochene Luftwellenzug vorteilhaft durch einen Vorgang in der Luft ſelber erregt wird, ſo der elektriſche Wellenzug durch einen Elektronenvorgang. Es kommen hier alle Teile der Abb. 111 in Benutzung; ſie ſtellt das grundſätzlich Weſentliche in einem der möglichen Ausführungsfälle der Schwingungserzeugung mittels Elektronen dar. LC iſt der zu erregende Oſzillator, der mit ſeiner Selbſtinduktion L und ſeiner Kapazität C die Schwingungsdauer beſtimmt. Er iſt einerſeits mit dem negativen Ende der energieliefernden Stromquelle K, andererſeits mit der Gitterelektrode E der Röhre verbunden. S iſt eine zu gegenſeitiger Induktion mit L gewickelte Spule, über welche die Leitung vom poſitiven Ende der Stromquelle K nach der Anode A geht. Der Oſzillator erhält ſeine Energiezufuhr, die ſein fortdauerndes Schwingen ermöglicht, aus K auf dem Wege über S durch Induktion in ſeine Spule L (vgl. 386), und es kommt darauf an, daß dies im richtigen Takte geſchieht, den der Oſzillator ſelbſt beſtimmt. Wie der Oſzillator in ein erſtes, ſchwaches Schwingen kommt, iſt nebenſächlich; es geſchieht das ſtets leicht bei irgendeinem Anſchaltevorgang. Die Einhaltung des richtigen Taktes der Energiezufuhr, ſo daß eine vorhandene Schwingung unterſtützt zum Höchſtmaß geſteigert und bei dieſem erhalten wird, iſt dadurch gegeben, daß die Energiezufuhr nur erfolgt, wenn E poſitive Ladung hat; denn dann iſt der Elektronenſtrom von U nach A vorhanden (468), der die Quelle K in Tätigkeit ſetzt. Der Strom von K hat dann den Kreisweg K S A U K; ſeine (wie ſtets im Sinne poſitiver Elektrizitätsbewegung, der Elektronenbewegung entgegengehend gedachte) Richtung iſt durch die Pfeile bei S und im Rohr, durchs Gitter gehend, angezeigt. Der induzierte Strom in L iſt dem Strom in S ungefähr[1]) entgegengerichtet (383),

[1]) Der Strom in S iſt nicht leicht ſinusförmig, ſo daß hier nicht genau die für Sinuswechſelſtröme geltenden einfachen Zuſammenhänge zu erwarten ſind, was aber in der Hauptſache nichts ändert.

wie es die Pfeile an S und L andeuten; er muß, wenn alles etwa noch durch Hilfseinrichtungen aufs beste abgepaßt ist, genau rechtzeitig das Zurückschwingen der positiven Ladung von C unterstützen, und diese Unterstützung kommt jedesmal selbsttätig, wenn die positive Ladung da ist, weil dann auch E sie hat. Es ist dies ein Vorgang analog dem am Uhrpendel, das ebenfalls selbst die Zeit bestimmt, zu welcher das Hemmungsrad ihm neuen Anstoß zum Ersatz verlorener Energie zu geben hat.

Soll die so unterhaltene ungedämpfte Schwingung zur Wellenaussendung dienen, wie im „Funkwesen" (432), so erhält der Oszillator die gestreckte, geradlinige Form (408), wobei aus den Belegungen von C einerseits der ausstrahlende Luftdraht („Antenne", „Sender") andererseits die Erdleitung („Gegengewicht") wird, damit die Wellen im Luftraum der Erde entlang laufen.

Ungedämpfte elektrische Schwingungen von höchster Periodenkonstanz erhält man durch geeignete Hinzuschaltung eines mit dem Schwingungskreis CL gleichfrequenten Quarzoszillators (113). Der Quarz übernimmt dann vermöge seiner relativ großen Masse die Regulierung der Schwingungsdauer und hält sie aufs genaueste konstant, wenn er auf konstanter Temperatur gehalten wird („quarzgesteuerter Sender").

Quarzuhr. — Der elektrisch schwingende Quarz bietet einen Bewegungsvorgang, der noch besser vor allen veränderlichen Beeinflussungen bewahrt werden kann als die Pendel der besten Sternwarteuhren; er ist daher zu grundsätzlich gesicherter Zeitmessung, zur Festhaltung einer Zeiteinheit (vgl. M 32, 33), besonders geeignet. Der Quarz kann vermöge seiner kleinen Abmessungen viel sicherer auf konstanter Temperatur gehalten und veränderlichen Reibungseinflüssen entzogen werden als ein Uhrpendel; er ist auch von etwaigen Änderungen der Gravitationskraft durch Verlagerungen im Erdkörper unabhängig und die elastischen Kräfte des Kristalls sind auch von gesicherterer Konstanz als die des Stahles der Spirale eines Chronometers. Um den Quarz zur Messung beliebig langer Zeiten benutzen zu können, läßt man seine schnellen Schwingungen durch Induktion auf langsamere Schwingungen regulierend wirken. Ist z. B. jede 6. Ausschwingung des schnellen elektrischen Kreises mit je einer des langsamen Kreises genügend annähernd gleichzeitig, so stellt sich durch die Induktionswirkung genaue Gleichzeitigkeit ein und man hat dann die konstante Frequenz auf $^1/_6$ geteilt vorrätig, z. B. statt 60000/sek 10000/sek. Dies wird in weiteren Stufen wiederholt, bis man zuletzt einen langsamen Wechselstrom erhält, der einen leichten Motor treibt, dessen Drehzahl ein durch die Anzahl seiner Polpaare bestimmter, fester Bruchteil der Stromwechselzahl[1]) und damit so konstant wie die Quarzschwingung ist. Der Motor betätigt einen Kontakt, der Zeitmarken (z. B. je Sekunde) auf einem schnell laufenden Papierstreifen gibt. Damit ist die Kontrolle von Pendeluhren und überhaupt beliebige Zeitmessung möglich.

Schnellste Elektronen.

478. Schnellere Kathodenstrahlen als etwa 0·7 Lichtgeschwindigkeit (200000 Volt, vgl. Tab. 53) sind in der Entladungsröhre schwer erreichbar, sei es mit kalter Kathode oder mit Glühkathode (476), weil das Glas der gebräuchlichen Röhren die erforderliche Spannung schlecht aushält[2]). Hier kamen die radioaktiven Atome zu Hilfe, die wir später für sich betrachten (547 u. f.); sie liefern in ihren β-Strahlen ganz von selber das, was künstlich so schwer erreichbar ist; die Geschwindigkeiten der β-Strahlen (551) gehen noch über 0·9 Lichtge-

[1]) Ein solcher „Synchronmotor" ist Umkehrung einer vielpoligen Wechselstrommaschine (378, vgl. 370).

[2]) Durch Unterteilung der Spannung mittels blendenförmiger Zwischenelektroden kann 1 Million Volt erreicht werden.

Eine besondere Vorrichtung, um elektrische Partikel irgendwelcher Art auf hohe Geschwindigkeiten zu bringen, ist das Zyklotron. Es läßt die Partikel in einem Magnetfeld quer zu dessen Kraftlinien im Kreise herumlaufen. Dies geschieht in einer zylindrischen Büchse (im Vakuum), die längs eines Durchmessers in zwei voneinander isolierte Hälften geteilt ist. Die Hälften werden entgegengesetzt elektrisch geladen, und zwar mit stets wechselndem Zeichen im Takte des Umlaufs der Partikel. Dadurch werden diese jedesmal bei Durchschreitung des Durchmessers beschleunigt, was ihre Bahnen erweitert, so daß sie Spiralen beschreiben. Schließlich treten sie am Rande der Büchse und des Magnetfeldes tangential mit Höchstgeschwindigkeit aus.

schwindigkeit hinaus. An diesen Strahlen wurden die Eigenschaften schnellster Elektronen untersucht.

479. Steigen der Masse des Elektrons mit seiner Geschwindigkeit. — Es tritt hier die Frage auf, wie weit die Geschwindigkeit der Elektronen überhaupt gehen kann.

Man kann versuchen, die schnellsten β-Strahlen durch elektrische Kraft noch weiter zu beschleunigen, wie dies mit den langsameren Kathodenstrahlen geschehen ist (460), und kann die Geschwindigkeit v und das Verhältnis e/m von Ladung zu Masse vor und nach der Beschleunigung ermitteln (453, 454). Solche Versuche sind mit vielen Abänderungen in großer Zahl ausgeführt; es hat sich gezeigt (zuerst 1901), daß bei schon hohen Geschwindigkeiten die weitere Beschleunigung versagt etwa in dem Maße, daß die volle Lichtgeschwindigkeit als unüberschreitbare Grenze erscheint.

Das Versagen der Beschleunigung kommt bei Durchführung der Messungen des Verhältnisses e/m = e/m, von Ladung zu Masse des Elektrons (458), dadurch zum Ausdruck, daß e/m um so kleiner gefunden wird, je größer die Geschwindigkeit v schon ist.

Sieht man die Ladung e des Elektrons und die auf dieselbe im Felde E ausgeübte Kraft e·E als unveränderlich, bei jeder Geschwindigkeit gleichbleibend an, so ist das Sinken von e/m als Steigen der Masse m aufzufassen. Das Versagen der Beschleunigung erscheint damit als ein Steigen der Masse des Elektrons bei steigender Geschwindigkeit, und diese Auffassung ist gerechtfertigt, weil das Steigen der Masse als Folge der gut nachgewiesenen Masse der Energie (434) einzusehen ist (480).

Alle bisherigen Messungen entsprechen einer Änderung der Masse m des Elektrons mit der Geschwindigkeit v nach der Gleichung[1])

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \qquad 479)$$

m_0 ist dabei die Masse bei $v = 0$, „Ruhmasse" zu nennen. Wird $v = c$, so wird $m = \infty$, was Unmöglichkeit der Überschreitung der Lichtgeschwindigkeit c bedeutet.

Das Verhältnis e/m, welches wir früher rund zu $1{\cdot}7 \cdot 10^8$ Coulomb/gr angaben (458), ist nach sämtlichen Messungen in genauerer Angabe $e/m_0 = 1{\cdot}76 \cdot 10^8$ Coulomb/gr (auf zwei Dezimalen gerundet; die dritte ist noch unsicher). Das Verhältnis sinkt (entsprechend Gl. 479) z. B. bei $v = 0{\cdot}9\ c$ auf $0{\cdot}77 \cdot 10^8$ Coulomb/gr. Die Ruhmasse ist, mit $e = 15{\cdot}9 \cdot 10^{-20}$ Coulomb (194, 195), $m_0 = 0{\cdot}90 \cdot 10^{-27}$ gr. Bei $v = 0{\cdot}87\ c$ ist die Masse verdoppelt.

In Tab. 53 (462) kommt das Ansteigen der Masse bis Unendlich dadurch zum Ausdruck, daß das Voltmaß V der Geschwindigkeit, die kinetische Energie, bei Lichtgeschwindigkeit des Elektrons ($v = 1$ in der Tabelle) ∞ wird.

480. Diese Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit (Gl. 479) ist als einfache Folge der Masse derjenigen Energie (434) anzusehen,

[1]) v ist in der Gleichung — wie unmittelbar aus ihr ersichtlich — in derselben Einheit gemessen einzusetzen wie die Lichtgeschwindigkeit c. Meist wird v in Teilen der Lichtgeschwindigkeit, d. i. mit dieser als Einheit angegeben.

welche dem Elektron bei seiner Beschleunigung zugeht und welche dann als Vermehrung seiner kinetischen Energie an ihm vorhanden ist.

Wenn das Elektron beschleunigt werden soll, so muß es ein elektrisches Feld durchlaufen, etwa wie in Abb. 108 (460) zwischen den beiden Kondensatorplatten a b, und dabei entnimmt es dem Feld Energie, die in sein eigenes Feld übergeht. Die Energieentnahme aus dem Feld ist daraus zu sehen, daß das Elektron bei seinem Eintritt ins Feld so viele Kraftlinien desselben von der Eintrittsplatte ablöst (vermöge einer Kraftlinienumformung ähnlich der in Abb. 84 in Bd. III, 85, erläuterten), als es selber hat, nämlich $4\pi e$, deren Zug dann die Beschleunigung besorgt; diese Kraftlinien verschwinden beim Austritt ganz aus dem Feld, so daß dasselbe um die Energie derselben ärmer geworden ist.

Es ist daher gar nicht zu bezweifeln, daß die Masse des Elektrons wegen Energieaufnahme aus dem beschleunigenden Felde wachsen muß, und der Zuwachs muß nach dem Energiegesetz gleich sein der Masse der Beschleunigungsarbeit, die als Produkt aus Kraft und Weg berechenbar ist. Die einfache Rechnung gleicht im Gedankengang vollkommen der in der Mechanik zur Ermittelung der Größe der kinetischen Energie durchgeführten Rechnung (M 146), nur muß hier für jedes Element des Beschleunigungsweges der auf demselben eintretende Massenzuwachs berücksichtigt werden. Das Ergebnis der kleinen Rechnung[1]) ist in der Tat Gl. 479; die Masse m_0 des ruhenden Elektrons steigt, wie es die Beobachtungen auch zeigten, auf m, wenn seine Geschwindigkeit v geworden ist, und zwar nur wegen der mit Erlangung dieser Geschwindigkeit nach dem Grundgesetz aller Bewegung (M 115) unvermeidlich verbundenen Kraftwirkung.

481. Abhängigkeit der Masse von ihrer Geschwindigkeit überall wo Geschwindigkeitsänderung durch Energieaustausch mit der Umgebung erfolgt. — Es ist aus der erläuterten Rechnung (480) ersichtlich, daß der in Gl. 479 enthaltene wichtige Zusammenhang nichts weiter enthält als das Energiegesetz, das Grundgesetz aller Bewegung — zwei bestgesicherte Gesetze —, dazu noch die aus dem Gedankenversuch mit dem Strahlungsdruck erlangte Kenntnis von der Masse aller Energie (434) und endlich die für den Fall des Elektrons besonders gesicherte Kenntnis davon, daß die zur Beschleunigung nötige Energie von außen her dem Elektron zugeführt wird (480).

Man sieht daraus, daß die Gl. 479 von sehr allgemeiner Bedeutung sein muß; sie muß überall gelten, wo Beschleunigungen irgendwelcher Massen stattfinden und wo die dazu nötige Energie von außen her der Masse zugeführt wird und nicht etwa, wie bei elektrischem Stromschluß (368), bei Entladung eines Kondensators (125), bei Wellenaussendung (410, 436) oder bei Gravitationswirkung (591), schon von vornherein in der beschleunigten Masse enthalten ist. Entsprechende Gültigkeit hat Gl. 479 auch für Verzögerungen von Massen.

Wir kommen in dieser allgemeinen Anwendung später auf die Gl. 479 zurück (589); es sei hier nur bemerkt, daß der Unterschied $m - m_0$ für alle gewöhnlichen Beschleunigungsfälle greifbarer Massen unbemerkbar klein ist, weil die

[1]) Man findet ihre Durchführung im Anhang E VI a.

vorkommenden Geschwindigkeiten v verschwindend klein sind gegen die Lichtgeschwindigkeit c, wodurch die Wurzel im Nenner der Gleichung ununterscheidbar nahe 1 wird; beim Elektron kommen aber Geschwindigkeiten bis nahe c vor, und dies hat es ermöglicht, durch die erwähnten Messungen (479) neue Erfahrung beizuziehen. Da dieselbe, in Übereinstimmung mit der erläuterten Rechnung (480), Gl. 479 ergibt, sind die in der Rechnung benutzten, aufgezählten älteren Erfahrungen von neuem gestützt, im besonderen auch die mittels Gedankenversuchs erschlossene Kenntnis von der Masse der Energie (434). Auch die Anwendbarkeit des an den Bewegungen großer, materieller Massen gefundenen Grundgesetzes der Dynamik (M 115) auf das Elektron ist damit erwiesen (vgl. 436).

482. Kraftfeld des bewegten Elektrons. — Die in so einfacher Weise berechenbare Massenvergrößerung und Energievergrößerung des Elektrons (480) kann auch aus der Änderung seines Kraftlinienfeldes bei Bewegung verstanden werden (vgl. 464). Die Änderung ist von zweierlei Art. Wir betrachten sie an einer mit der Elektrizitätsmenge e geladenen Kugel, von der man mehr weiß als vom Elektron.

Erstens wächst die elektrische Energie durch Umgruppierung der Kraftlinien ohne Änderung der Zahl $4\pi e$ derselben. Wir hatten gefunden (415), daß das seitliche Drängen der Kraftlinien aufhört, wenn ihre Querbewegung Lichtgeschwindigkeit erreicht. Die dementsprechende Abnahme des Drängens schon bei geringeren Geschwindigkeiten läßt die Kraftlinien dort, wo sie Querbewegung haben, dichter zusammengehen, wo sie aber Längsbewegung haben, mit unvermindertem Drängen auseinandergehen, was wir auch früher schon bemerkten (464). Dadurch verwandelt sich das in Ruhe allseitig gleichförmige, in Abb. 112a dargestellte Feld der elektrischen Ladung schließlich bei Lichtgeschwindigkeit in eine zur Bahn senkrecht stehende Scheibe (Abb. 112c), in welche alle Kraftlinien dicht zusammengedrängt sind. Bei zwischenliegenden Geschwindigkeiten tritt Zwischenliegendes ein; die Kraftlinien verdichten sich mit steigender Geschwindigkeit allmählich gegen jene Ebene hin. Dies vermehrt aber den Energieinhalt des Feldes. Denn der Energieinhalt jedes Raumteiles des Feldes, die Energiedichte, ist nicht pro-

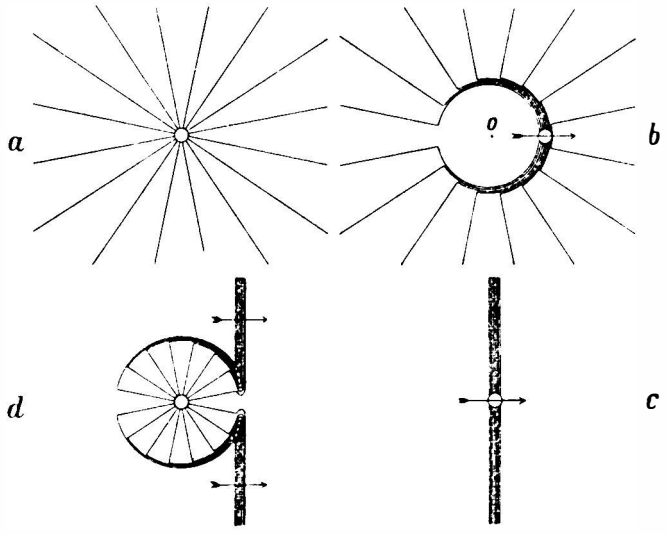


Abb. 112. Beschleunigte und verzögerte Ladung.

portional der Kraftliniendichte E, sondern ist proportional E^2 (123). Die Summe aller E^2, genommen über den ganzen Raum, wächst aber bei steigender Ungleichförmigkeit der Kraftlinienverteilung. Man sieht das in beliebigem Beispielsfalle ein: wenn Kraftlinien die Hälfte eines Raumes verlassen und in der anderen Hälfte zusammengedrängt werden, so ist die ursprüngliche Gesamtenergie, gegeben durch E^2, auf $\frac{1}{2}(2E)^2 = 2E^2$, also aufs Doppelte gestiegen. Wenn die Kraftlinien der bewegten Kugel, wie in Abb. 112c sogar zu unendlicher Dichte zusammengedrängt sind, ist die Energie und damit auch die Masse unendlich geworden.

Der zweite Grund des Anwachsens der Energie besteht im notwendigen Hinzukommen des Magnetfeldes zum elektrischen Felde, gemäß dem elektrodynamischen Zusammenhang, sobald dasselbe Querbewegung hat. Wir haben auch dies schon vorher betrachtet (464, Abb. 109) und dabei das schon allein wegen des Hinzutretens der Magnetkraftlinien zur unverminderten Zahl der elektrischen Kraftlinien notwendige Ansteigen der Feldenergie bei Bewegung erwähnt. Bei Lichtgeschwindigkeit wäre die Energie des Magnetfeldes gleich der des elektrischen Feldes (331, 365), was nochmal den Beitrag Unendlich zur Gesamtenergie und also auch zur Gesamtmasse liefert. Daß die Energie des Magnetfeldes des beschleunigten Elektrons (und auch einer beschleunigten geladenen Kugel) nicht aus der Energie seines elektrischen Feldes stammt, sondern daß sie bei der Beschleunigung von außen her neu zugeführt wird (aus der Energie des beschleunigenden Feldes, 480), dies ist daraus zu schließen, daß die Beschleunigung hier nicht durch das Drängen der eigenen elektrischen Kraftlinien des Elektrons erfolgt (vgl. 481).

483. Plötzlich beschleunigte und wieder zur Ruhe gebrachte Ladung. — In Abb. 112 ist außerdem noch, in den Augenblicksbildern b und d, der Fall plötzlicher Geschwindigkeitsänderungen einer geladenen Kugel mit den zugehörigen Umbildungen der elektrischen Kraftlinien dargestellt, wie sie nach den bekannten Eigenschaften der Kraftlinien zu erwarten wären. Zu bemerken ist allerdings, daß die Darstellung nur die Grenzfälle plötzlicher Erteilung von Lichtgeschwindigkeit, von a aus, und dann plötzlicher Zuruhesetzung der Kugel, von c aus, betrifft — Fälle also, die unendlich große Energiezufuhr bzw. -Abfuhr in unendlich kurzer Zeit erforderten und die somit nicht zu verwirklichen sind, die aber doch einigen Einblick für mögliche Fälle unterhalb Lichtgeschwindigkeit geben. In der Zeit zwischen a und b (Abb. 112) ist die Kugel vom Mittelpunkt o bis in die in Abb. b beim Pfeil ersichtliche Lage gekommen; ihre Kraftlinien gehen wegen ihrer Lichtgeschwindigkeit alle quer von ihr aus; sie setzen sich über eine Kugelfläche mit dem Mittelpunkt o fort zum Anschluß an ihre radial auseinandergehenden Teile, die noch, unberührt davon, daß die Kugel nicht mehr in o ist, weiterbestehen, wie in a. Die mit Kraftlinien bedeckte Kugelfläche um o erweitert sich in der Folgezeit mit Lichtgeschwindigkeit, welche die Quergeschwindigkeit ihrer Kraftlinienteile, ebenso wie die Geschwindigkeit der geladenen Kugel ist. Die Kugelfläche wird dabei nach genügend langer Zeit eben, und es entsteht so das Bild c in der Nähe der bewegten, geladenen Kugel. Wird dieselbe nun plötzlich angehalten, so läuft die große, in der Querebene enthaltene Energiemenge wegen ihrer Masse mit Lichtgeschwindigkeit weiter, als eine besonders geartete elektromagnetische Querwellenfront; ihre Kraftlinien hängen aber noch immer an der Kugel mit der Ladung, an welcher sie jetzt wieder radial enden, weil die Kugel jetzt ruht. Die Verbindung zum fortlaufenden Teil der Kraftlinien wird wieder durch eine Kugelfläche gebildet, die mit Lichtgeschwindigkeit sich erweitert. Nach genügend langer Zeit entsteht dann in großer Umgebung um die ruhende Kugel wieder das Kraftlinienbild a.

484. Energie des bewegten und des ruhenden Elektrons nach Maxwells Gleichungen. — Man kann das Kraftfeld des bewegten Elektrons (482) — oder vielmehr einer bewegten, geladenen Kugel, die wieder an Stelle des Elektrons betrachtet werde — auch quantitativ, in Rechnung nach Maxwells Gleichungen (406) verfolgen, wenn man der Kenntnis von den Kraftlinien entsprechende Zusatzannahmen für diesen Fall eines nicht „ruhenden Körpers" zu Hilfe nimmt. Der gesamte Energieinhalt wird dabei durch Summierung von $(E^2+H^2)/8\pi$ (123, 364) über alle Raumelemente erhalten, wonach auch die Masse bekannt ist (434).

Für das Ergebnis der Summierung ist am allermeisten die nächste Umgebung der Kugel maßgebend, weil dort alle Kraftlinien am dichtesten sind, so daß diese nächste Umgebung der Hauptsitz der Energie und damit auch der Masse ist. Aus diesem Grunde kommt es aber bei der Rechnung sehr auf Dinge an, von denen man nichts weiß, wenn die Kugel ein Elektron ist, nämlich auf das letzte Zusammenlaufen der Kraftlinien am Elektron oder, wenn man so sagen will, auf Größe, Form und sonstige Beschaffenheit des Elektrons, wobei immer noch außerdem

die angenommene Kraftlinienverteilung, gleich der eines mit vielen Elektronen geladenen Körpers zweifelhaft ist, wie schon früher bemerkt (464). Man kann zwar Annahmen über diese unbekannten Dinge machen, die Rechnung unter diesen Annahmen durchführen und dann zusehen, ob eine der Annahmen Ergebnisse liefert, die mit der Wirklichkeit stimmen. Dies ist reichlich geschehen; jedoch darf man nicht übersehen, daß die Gültigkeit solcher Rechnungen nach Maxwells Gleichungen überhaupt sehr fraglich ist. Diese Gleichungen, höchst wertvoll und erprobt gültig für die Felder der großen Mengen von Elektrizität, an denen die in den Gleichungen verdichtete Erfahrung gewonnen ist, enthalten gar nichts von den Elektrizitäten selber, deren Dasein auch gar nicht aus den Gleichungen zu erweisen war; sie können daher unmöglich sichere Auskunft geben über die Beschaffenheit des Kraftfeldes des einzelnen Elektrons. Vielleicht gelten die Gleichungen für ein einzelnes Elektron oder dicht bei demselben überhaupt nicht mehr.

Um so wichtiger ist es, daß der mit den Messungen an den Elektronen in Übereinstimmung befindliche Zusammenhang von Masse und Geschwindigkeit (Gl. 479) ohne jedes Eingehen auf Kraftlinieneigenschaften und auf Einzelheiten des Elektrons aus allgemeingültigen Sätzen hergeleitet werden konnte (480), so daß kein Anlaß ist an seiner Gültigkeit zu zweifeln.

Nicht zu bezweifeln ist auch, daß der Massenzuwachs bis Unendlich, bei steigender Geschwindigkeit, Masse der durch die Bewegung hinzutretenden Feldenergie ist, die, wie wir sahen (482), auch unabhängig von den unbekannten Besonderheiten in der Nähe des Elektrons bei $v = c$ ∞ wird.

485. Es bleibt noch die Frage nach der Art der Ruhmasse m_0 des Elektrons, im besonderen ob sie auch nur Energiemasse ist. Es ist kein Anlaß zu anderer als bejahender Antwort. Das Elektron als Träger des Feldes der Elektrizitätsmenge e muß notwendigerweise die Masse der elektrischen Energie dieses Feldes haben, und m_0 ist bei einiger Geschwindigkeit, wie wir sahen (479), sogar nur ein kleiner Teil der schon als Energiemasse erkannten Gesamtmasse m.

Die Masse des Feldes der ruhenden Elektrizitätsmenge e kann jede beliebige Größe annehmen, wenn die Kraftlinien entsprechend dicht gruppiert werden. Beispielsweise würde bei einer geladenen, leitenden Kugel, wenn man dieselbe beliebig klein machen kann, die Feldenergie und also auch die Masse sogar unendlich groß bei endlicher Ladung, sobald der Kugelradius Null wird, weil die Kraftlinien dann an der zum Punkt gewordenen Kugel zu unendlicher Dichte zusammenliefen.

486. Räumliche Abmessung des Elektrons. — Wollte man das Elektron als eine Leiterkugel ansehen, so wäre es nach vorigem leicht, den Kugelradius r anzugeben, bei welchem die bekannte Ladung e die vorgegebene Masse m_0 besitzt und der somit Elektronenradius wäre. Die Rechnung ist sogar sehr einfach: Die elektrische Energie $\mathfrak{E}$ der zur Spannung V geladenen Kugel ist $\mathfrak{E} = \frac{1}{2} Ve$ (119); die Kapazität der Kugel ist in elektrostatischer Einheit gegeben durch ihren Radius r (56), die Spannung ist also $V = e/r$ (47) und daher $\mathfrak{E} = e^2/2r$. Für die Masse dieser Energie gilt also $m_0 = \mathfrak{E}/c^2 = e^2/2rc^2$, aus welcher Gleichung r mit den bekannten Daten für e, m_0 und c leicht berechnet wird. Man findet $r = 1{\cdot}4 \cdot 10^{-13}$ cm. Dies ist weniger als 2 hunderttausendtel eines durchschnittlichen Atomradius, und die Kleinheit dieser Abmessung würde damit übereinstimmen, daß das Elektron Bestandteil aller Atome ist (458, 520 u. f.). Die Berechnung muß aber, wie alle ihr ähnlichen mit anderen Annahmen über die Beschaffenheit des Elektrons, verworfen werden; denn sie ist die quantitative Auswertung eines unerlaubten Gedankenversuchs (M 86)[1]).

Alles was bei der Unkenntnis der Beschaffenheit des elektrischen Feldes des einzelnen Elektrons über dessen räumliche Abmessung gesagt werden kann,

[1]) Der Gedankenversuch besteht darin, daß die dem Elektron zugehörige Elektrizitätsmenge e in Zerteilung aus großer Ferne auf die Kugel vom Radius r gebracht wird, wofür die nötige Arbeit zu berechnen ist, um die Spannung zu ermitteln (30). Das Unerlaubte, nach vorhandener Kenntnis Naturwidrige ist hierbei die gedachte Unterteilung von e, da man doch kleinere Elektrizitätsmengen als e überhaupt nicht kennt.

ist nur, daß die stärksten Teile des Feldes, welche für die Masse hauptsächlich bestimmend sind, auf einen Raum beschränkt sein müssen, der fast verschwindend klein ist gegenüber dem Eigenraum eines Atoms. Denn Elektronen sind, zusammen mit positiven Elementarquanten, Grundbestandteile aller Atome, bei den schweren Atomen in großer Zahl (532), und sie füllen doch den Atomraum keineswegs mit ihren starken Feldern (537). Die quantitative Untersuchung der Absorption schnellster Kathodenstrahlen in der Materie (489, 491) zeigte nämlich die Atome so sehr durchlässig für die Elektronen dieser Strahlen, daß einem Elektron zusammen mit einem positiven Elementarquant (Proton, 533) des Atoms, d. i. einer Dynamide (531), nicht mehr undurchlässiger Raum zukommt als der einer Kugel von $3 \cdot 10^{-12}$ cm Radius, d. i. 1 Zehntausendtel Atomradius (537)[1]).

Das Zusammenwirken bewegter Elektronen mit Atomen (Molekülen).

487. Übersicht. — Als „Kathodenstrahl" können wir nach erlangter Kenntnis (452 u. f.) eine Gesamtheit von Elektronen bezeichnen, die nach Richtung und Größe nahe gemeinsame Geschwindigkeit haben — oder kurz ein Bündel zusammengehöriger Elektronenbahnen.

Wir haben das Verhalten der Elektronen den Atomen gegenüber schon an den mittelschnellen Strahlen als Diffusion und Absorption betrachtet, soweit es der Beobachtung fast unmittelbar zugänglich wurde (443 f., 447 f.); es kommt jetzt auf zusammenfassende Betrachtung aller vorhandenen Kenntnis über die Ereignisse beim Zusammentreffen von Elektronen mit Atomen an. Dabei sind auch alle Elektronengeschwindigkeiten, von Null bis Lichtgeschwindigkeit (476 u. f., 478 u. f.), zu berücksichtigen.

Abb. 113 gibt eine schematische Übersicht der möglichen Ereignisse. Die Kreise bedeuten dabei die Kugel, innerhalb deren das Atom (Molekül) mit allem sich befindet, was an ihm für seinesgleichen undurchdringlich ist, den Raum, welchen man Eigenraum des Atoms nennen kann. Die Größe dieser Kugelräume hat die kinetische Gastheorie eingehend nach der Beobachtung kennen gelehrt (W 90, 102—106); danach ist unten in der Abbildung der Maßstab für den Kugeldurchmesser angegeben, wie er für verschiedene Atome gilt (vgl. Tab. 1 in Bd. I). Die Linien mit den

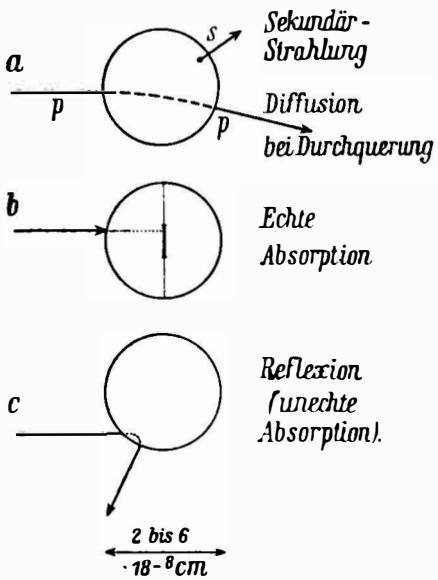


Abb. 113. Elektron und Atom.

[1]) Der wirkliche Eigenraum der stärksten Felder der Elementarquanten ist nach anderen Anzeichen noch viel kleiner als dieser Grenzwert (vgl. 540). Es sind aber auch nicht alle Dynamiden einander gleich (542).

Pfeilen bedeuten Elektronenbahnen. Die verschiedenen Fälle werden im folgenden in allgemeinem Zusammenhange erläutert. Elektronengeschwindigkeiten geben wir dabei zumeist in Bruchteilen der Lichtgeschwindigkeit c an.

488. Durchquerung und Geschwindigkeitsverlust. — Wir haben bereits nachgewiesen, daß die als Diffusion der Kathodenstrahlen (443) zu beobachtenden Bahnablenkungen der Elektronen in der Materie, welche einen ursprünglich parallelen Strahl nicht sogleich auflösen, sondern nur divergent machen, als Folge der Durchquerung der Atome aufzufassen sind, d. i. der Durchsetzung des Atominneren durch die Strahlelektronen, wobei die Bahnen derselben Krümmung erleiden können (Abb. 113a). Reflexionen der Elektronen an den Atomen (Abb. 113c) würden, wie nachgewiesen (444), viel stärkere Strahlverbreiterungen bei Durchsetzung der Materie ergeben, als beobachtet sind. Wir behandeln die vorwiegend bei langsamsten Elektronen vorkommende Reflexion gesondert (492) und betrachten jetzt die Durchquerungen.

Es zeigte sich (444), daß eine einzelne Durchquerung im Mittel sehr wenig Ablenkung hervorbringt, und dies gilt um so mehr, je größer die Geschwindigkeit ist (459). Je schneller die Elektronen sind, desto gradliniger laufen sie im allgemeinen durch die Materie.

Mit der Abänderung der Richtung ist durchschnittlich auch eine Abänderung der Größe der Geschwindigkeit der durchquerenden Elektronen verbunden; sie erleiden einen Geschwindigkeitsverlust. Man kann die durchschnittliche Größe des Verlustes, genommen über viele Durchquerungen, leicht bei Durchstrahlung bekannter Schichtdicken von Materie ermitteln, und man findet den Geschwindigkeitsverlust erstaunlich gering und zwar um so geringer, je größer die Geschwindigkeit ist. So nimmt beispielsweise bei Durchstrahlung einer 0·003 mm dicken Aluminiumschicht (ungefähre Dicke des Fensters der Röhre Abb. 101) eine ursprüngliche Geschwindigkeit von 0·3 c nur um etwa 0·02 c ab, eine ursprüngliche Geschwindigkeit von 0·9 c sogar nur um 0·0002 c. Dabei liegen auf der durchstrahlten Dicke von 0.003 mm rund 10000 Aluminiumatome, die durchquert werden, so daß der durchschnittlich auf eine Durchquerung entfallende Geschwindigkeitsverlust außerordentlich gering ist.

Solche Durchschnittsberechnungen geben aber keine zutreffende Auskunft über das tatsächliche Verhalten des einzelnen Atoms. Denn man findet bei Untersuchung verdünnter Gase oder äußerst dünner Schichten fester Körper, wobei so wenig Durchquerungen aufeinander folgen, daß man auf die Wirkung einzelner Durchquerungen schließen kann, daß die Einzelwirkungen von eigentümlich abgestufter Größe sind. An dicken Schichten beobachtete Gesamtwirkungen sind demnach sehr ungleich auf die einzelnen Atome verteilt.

Die Geschwindigkeitsverluste in verdünnten Gasen sind besonders bei langsamen Strahlen untersucht; es zeigte sich, daß die Einzeldurchquerungen stufenweise Verluste geben, die in Voltzahlen (462) ausdrückbar sind, also Energieverluste bedeuten. Die beobachteten Verluststufen betragen einige Volt, und jeder Molekülart gehören im allgemeinen mehrere mögliche Stufen zu. Es ist anzunehmen, daß die nach vielen Durchquerungen beobachtbaren größeren Geschwindigkeitsverluste stets aus den einzelnen, den betreffenden Molekülen zugehörigen Stufen zusammengesetzt sind. Auch bei schnellen Strahlen ist nach-

gewiesen, daß die Geschwindigkeitsverluste stufenweise stattfinden (in Al mit Stufen von 16 Volt). Alle derartige Erscheinungen können als Zeichen des quantenhaften Arbeitens der Atome (W 181) aufgefaßt werden.

Sehr bemerkenswert ist es, daß bei den schnellen Strahlen auch Durchquerungen ganz ohne Energieverlust reichlich vorkommen. Dies ist sowohl durch die Geringfügigkeit des Gesamtgeschwindigkeitsverlustes bei den außerordentlich großen Durchquerungszahlen in festen Körpern angezeigt als auch durch die Geringfügigkeit der Sekundärstrahlung bei den großen Geschwindigkeiten (494), da die Energie der Sekundärelektronen von der Primärstrahlung genommen wird (497).

So wie für die Größenänderung der Geschwindigkeit bei den Durchquerungen gilt es wohl auch für die Richtungsänderung, daß sie nicht in beliebigen Beträgen stattfindet. Dies kann Anteil an den bei der geordneten Diffusion beobachteten Ringerscheinungen (446) haben.

489. Absorption bei verschiedenen Geschwindigkeiten. — Wir haben die Absorption der Kathodenstrahlen bereits durch die Intensitätsverminderung der Strahlen bei Durchsetzung von Materie meßbar und durch das

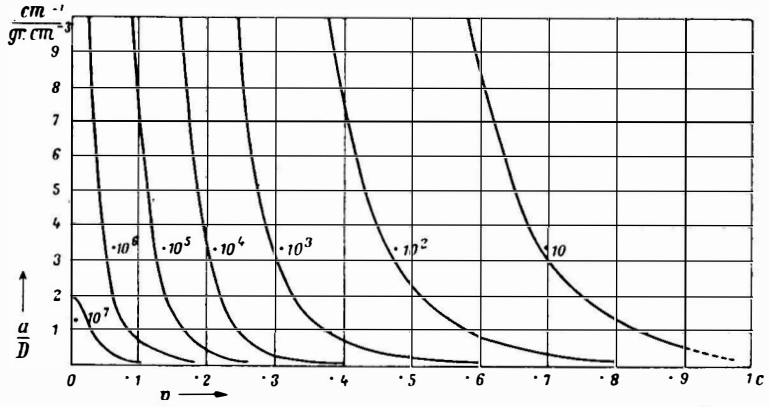


Abb. 114. Kathodenstrahlabsorption bei verschiedener Geschwindigkeit.

mit a bezeichnete Absorptionsvermögen des betreffenden Stoffes in Zahlen festlegbar gezeigt (447). Als Maß der Kathodenstrahlintensität ist nach Erkenntnis der Natur der Strahlung die von ihnen getragene Elektrizitätsmenge gegeben.

Es sind Absorptionsmessungen von den größten bis zu den kleinsten Strahlgeschwindigkeiten an sehr vielen Stoffen durchgeführt. Wegen der nahen Massenproportionalität der Absorption (448) können die Ergebnisse im groben sehr einfach für alle Stoffe zusammengefaßt werden durch Angabe des Verhältnisses a/D von Absorptionsvermögen zu Dichte für die verschiedenen Geschwindigkeiten. Dies ist in Abb. 114 geschehen. Abszisse ist die Strahlgeschwindigkeit v in Bruchteilen der Lichtgeschwindigkeit c, Ordinate das Verhältnis a/D mit der Einheit (vgl. 447) $cm^{-1}/gr\ cm^{-3}$. Die alle Einzelergebnisse verbindende Linie ist in 7 verschiedenen Ordinatenmaßstäben gezeichnet. Denn die Absorption nimmt ebensoviele Größenordnungen an, wenn die Geschwindigkeit von c bis

gegen 0 herabsinkt; sie steigt dabei so mächtig an, daß die Linie immer wieder mit 10-fach verkleinerten Ordinaten fortzusetzen war. Dem entsprechen die den einzelnen Linienteilen beigeschriebenen Multiplikatoren, welche dem links angegebenen Ordinatenmaßstab zugefügt werden müssen, um a/D stets in der angegebenen Einheit zu erhalten. Man sieht aus dem Lauf der Linien, daß Absorptionen bis zu Geschwindigkeiten über 0·9 c gemessen sind. Der Verlauf der Linie zeigt dort ein Verschwinden aller Absorption gegen $v = c$ hin an, und dies widerspricht nicht der bei $v = c$ unendlich großen Masse des Elektrons (479, 480). Bei $v = 0{\cdot}3c$ entnimmt man der Linie $a/D = 3000$, was mit den Angaben der Tab. 52, die auf rund $\frac{1}{3}$ c sich bezieht (454), durchschnittlich stimmt. Bei kleinsten Geschwindigkeiten, unterhalb 0·1c, erreicht die Linie einen Höhepunkt, den sie nicht überschreitet (490).

490. Absorption bei kleinsten Geschwindigkeiten. — Es erfolgt gegen die Geschwindigkeit Null hin sogar ein Herabsinken der Absorption von ihrem Höchstwert. Dieser Verlauf in der Nähe von $v = 0$, mit seinen Einzelheiten, ist im Abszissenmaßstab der Abb. 114 nicht darstellbar; es müßte derselbe dazu aufs 10- bis 100-fache vergrößert werden.

Außerdem ist zu bemerken, daß bei den kleineren Geschwindigkeiten jeder Stoff Besonderheiten zeigt; die Massenproportionalität hört hier auf; die Abb. 114 gilt von $v = 0{\cdot}1c$ abwärts ungefähr für Luft. Die Besonderheiten sind am eingehendsten für Geschwindigkeiten von 1 bis 25 Volt (0·002c bis 0.01c) studiert. Es kann in diesem Gebiet die Absorption bei sinkender Geschwindigkeit sogar bis fast Null heruntergehen, wie bei hohen Geschwindigkeiten, was außerordentlich bemerkenswert ist, weil die bisherige Kenntnis vom Atominneren solchen Verlauf nicht anzeigt. Es hat beispielsweise Argon bei 13 Volt seinen Höchstwert der Absorption, bei 0·4 Volt aber fast die Absorption Null, unter 0·4 Volt gegen 0 Volt hin wieder ansteigende Absorption. Viele Gase und Dämpfe sind in diesem Geschwindigkeitsgebiet untersucht; sie zeigen alle ihre eigenen Besonderheiten, allerdings mit gruppenweisen Ähnlichkeiten.

Ob auch bei den größeren Geschwindigkeiten, wo nahe Massenproportionalität gilt, Besonderheiten der Stoffe vorhanden sind, die über die bereits erwähnten Abweichungen von der Massenproportionalität (449) hinausgehen, ist noch nicht festgestellt; überhaupt ist die umfassende Liniendarstellung der Abb. 114 keineswegs bei allen Geschwindigkeiten gleich gut gesichert.

491. Absorbierende Querschnitte der Atome. — Da die Durchlässigkeit der Materie für Kathodenstrahlen auf den Atomdurchquerungen beruht (444, 488), ist die Absorption dahin zu deuten, daß gewisse Teile des Atomquerschnittes die Eigenschaft haben, die Durchquerung nicht zu gestatten, wodurch sie hintreffende Elektronen aus dem Strahl ausschalten. Wir nennen diesen Querschnittsteil des Atoms seinen „absorbierenden Querschnitt“[1]).

Die Größe des absorbierenden Querschnitts kann in cm^2 ermittelt werden. Es bedeutet nämlich das experimentell ermittelbare Absorptionsvermögen a (447) die Summe der absorbierenden Querschnitte aller in 1 cm^3 des Stoffes enthaltenen Atome[2]). In der Tat hat a die Dimension $cm^2/cm^3 = cm^{-1}$ (447).

[1]) Analog dem absorbierenden Querschnitt können auch andere „Wirkungsquerschnitte“ betrachtet werden (sekundärstrahlender Querschnitt, reflektierender Querschnitt, echt absorbierender Querschnitt; vgl. 493 u. f.).

[2]) Der einfache Nachweis findet sich im Anhang E VII.

Da die Zahl der Atome im cm^3 leicht angebbar ist (W 102), ist auch der absorbierende Querschnitt des einzelnen Atoms angebbar und mit dem vollen Querschnitt vergleichbar. Man kann aber auch die Summe der absorbierenden Querschnitte unmittelbar vergleichen mit der Summe der gaskinetischen Querschnitte (W 90), welche letztere für die gegenseitige Undurchdringlichkeit der Atome (Moleküle) bei der Wärmebewegung gilt und aus der Kenntnis der inneren Reibung in Gasgestalt ermittelbar ist (W 94—100).

Aus dem Verlauf der Absorption bei verschiedenen Geschwindigkeiten, Abb. 114, ist klar, daß der absorbierende Querschnitt eines gegebenen Atoms außerordentlich verschiedene Größen annimmt je nach der Geschwindigkeit des Elektrons. Er ist fast verschwindend klein in der Nähe von $v = c$ (489), und am größten ist er bei dem Höchstwert der Absorption, welchen wir bei den kleinen Geschwindigkeiten fanden (490).

Es ist von besonderem Interesse, diesen *größten absorbierenden Querschnitt* mit dem gaskinetischen Querschnitt zu vergleichen. Man findet, daß beide im allgemeinen von gleicher Größenordnung sind, so daß das ganze Atom undurchlässig für Elektronen der betreffenden Geschwindigkeit ist. Es kann aber der absorbierende Querschnitt sogar den gaskinetischen Querschnitt wesentlich übertreffen; beim Argonatom z. B. ist der größte gefundene absorbierende Querschnitt das 3·7-fache des gaskinetischen Querschnitts. Es sind damit ziemlich weit *in die Umgebung der Atome reichende elektromagnetische Kraftfelder* nachgewiesen; sie gehören wohl unzweifelhaft den chemischen und Molekularkräften zu (vgl. M 251).

Der bei allen Atomen außerordentlich klein gefundene absorbierende Querschnitt für schnellste Elektronen zeigt, daß diese die Atome fast an allen Stellen durchqueren können. Fast das ganze Atominnere ist demnach frei von Teilen, die undurchdringlich für genügend schnelle Elektronen wären. Die durch die Absorption und Diffusion der langsameren Elektronen angezeigten elektromagnetischen Kraftfelder des Atominneren (521) können demnach nur äußerst kleine vielleicht undurchdringliche Zentren haben; *der größte Teil des Atominneren zeigt sich leer*, wie der freie Äther außerhalb von Materie, der auch elektromagnetische Kraftfelder enthalten kann. Wir verfolgen diese Erkenntnis über die Art der Raumerfüllung der Atome im weiteren noch eingehender (534 u. f.).

492. *Echte und unechte Absorption; Reflexion.* — Eine besondere Frage ist es, in welcher Weise die Elektronen, welche den absorbierenden Querschnitt treffen, aus dem Strahle ausgeschieden werden. Es kann das in zweierlei Weisen geschehen: das Elektron kann im Atom festgehalten werden; es kann aber auch seitwärts oder rückwärts reflektiert werden. Ersteres ist „echte Absorption" zu nennen, letzteres „unechte Absorption" (Abb. 113b und c). Unechte Absorption ist dasselbe wie Reflexion. Letztere unterscheidet sich von der Diffusion (Abb. 113a) durch die im allgemeinen allseitige Verteilung der reflektierten Elektronen, so daß sie das Strahlenbündel verlassen, während die Diffusion zwar die Richtungseinheitlichkeit des Bündels stört, aber doch die Elektronen so weit in demselben bleiben läßt, daß sie als nichtabsorbiert gemessen werden. Da aber Diffusion und Reflexion nur in der Stärke der Richtungsabänderung der Elektronen voneinander verschieden sind, können *Übergänge zwischen*

Reflexion und Diffusion auftreten, was eine Schwierigkeit scharfer Begrenzung der Absorption bedeutet (s. 450).

Ob die Absorption echt oder unecht ist, kann bei Absorptionsmessungen nicht unmittelbar unterschieden werden; es ist dazu besondere Untersuchung der Umgebung des Strahles nötig. Es hat sich gezeigt, daß die echte Absorption vorwiegend den größten, die unechte — die Reflexion — vorwiegend den kleinsten Geschwindigkeiten zugehört. Die echte Absorption ist vollständige Vernichtung der Elektronengeschwindigkeit. Die Reflexion kann sogar ganz ohne Geschwindigkeitsverlust stattfinden, und es ist dies bei kleinsten Geschwindigkeiten sogar sehr überwiegend der Fall.

Bei der Reflexion am einzelnen Molekül (Atom) sind bestimmte Richtungen der abgehenden Elektronen bevorzugt, ähnlich wie bei der Diffusion (446, 488); so reflektiert z. B. das Wasserstoffmolekül langsamste Strahlen vorzugsweise rückwärts, das Argonatom vorzugsweise seitwärts. Bei vielfacher Wiederholung der Reflexion an vielen Molekülen ergibt sich ungefähr gleichmäßige Zerstreuung der reflektierten — unecht absorbierten — Elektronen nach allen Richtungen.

An festen, auch flüssigen Körpern ist außer der allseitig diffusen Reflexion (Rückdiffusion) der schnellen Strahlen auch eine geordnete Reflexion langsamer Strahlen mit abwechselnden Höchst- und Mindestwerten der Intensität, je nach dem Einfallswinkel der Strahlen, beobachtet, die man, gleich der geordneten Diffusion, nach Wellenrechnungen deutet (446 Fußnote).

493. Sekundärstrahlung. — Es ist dies eine Begleiterscheinung der Durchquerungen, vielleicht auch der Reflexion; das durchquerende Elektron veranlaßt den Austritt eines Elektrons aus dem durchquerten Atom (Abb. 113a): Ein „primäres" Elektron (p) tritt ins Atom ein, und zwei, das primäre und ein „sekundäres" (s) treten aus. Der Vorgang ist eingehend in reinen Versuchen nachgewiesen an verdünnten Gasen und an festen Körpern im Vakuum. Es ist damit auch gezeigt, daß aus elektrisch neutralen Gasmolekülen Elektronen entweichen, und dies ist der unmittelbarste Nachweis dafür, daß Elektronen Bestandteile elektrisch neutraler Atome sind (vgl. 466).

Die Sekundärelektronen sind stets sehr viel langsamer als die primären; man kann sie durch geeignete elektrische Felder beschleunigen und dadurch auch an Phosphoreszenzschirmen sichtbar machen; ihre Menge im Verhältnis zur Primärmenge kann mit dem Elektrometer gemessen werden.

Die sekundäre Geschwindigkeit ist nicht einheitlich, ähnlich wie bei den anderen, schon betrachteten Vorgängen des Entweichens von Elektronen aus Materie, der lichtelektrischen und der glühelektrischen Wirkung (468, 476). Bei mittleren Primärgeschwindigkeiten ist eine Sekundärgeschwindigkeit von etwa 2 Volt am meisten vertreten und zwar ganz oder nahe unabhängig von der Größe der Primärgeschwindigkeit; erst bei Primärgeschwindigkeiten über etwa $0{\cdot}6c$ kommen wesentlich größere Sekundärgeschwindigkeiten hinzu (vgl. 516), die bei $0{\cdot}9c$ Primärgeschwindigkeit 50 Volt und mehr betragen.

Die Menge der Sekundärstrahlung ist bei verschiedenen Stoffen nahe massenproportional, wie die Absorption und Diffusion (448, 445).

494. Sehr eigentümlich ist die Abhängigkeit der sekundären Menge von der primären Geschwindigkeit. Abb. 115 zeigt diese Abhängigkeit für Luft von 1 Atm. Druck bei Zimmertemperatur. Abszisse ist die Primärge-

schwindigkeit in Bruchteilen der Lichtgeschwindigkeit c, Ordinate ist die von je 1 Primärelektron auf 1 cm seines Weges freigemachte Sekundärelektronenzahl. Wir nennen diese Angabe die „direkte differentiale" Sekundärstrahlung.

Gemessen wird sie an Strahlenbündeln, denen man die Sekundärelektronen durch ein geeignetes elektrisches Feld entzieht, was wegen deren geringer Geschwindigkeit leicht möglich ist und wobei es nicht stört, wenn die Sekundärelektronen etwa an Gasmolekülen echt absorbiert sind. Ebenso können diejenigen Gasmoleküle zur Messung am Elektrometer gesammelt werden, welche die Sekundärelektronen verloren haben und die deshalb positiv geladen übrig bleiben. Der Raum um das Strahlenbündel muß bei diesen Messungen seitlich genügend eng begrenzt sein, weil sonst die unecht absorbierten, seitlich aus dem Bündel entweichenden Primärelektronen unberechenbare weitere Wege zurücklegen, auf denen sie ebenfalls Sekundärelektronen freimachen. Daß dies berücksichtigt ist, so daß die Angabe tatsächlich auf 1 cm Elektronenweg sich bezieht, der meßbar und unabsorbiert zurückgelegt ist, dies will das Beiwort „direkt" in

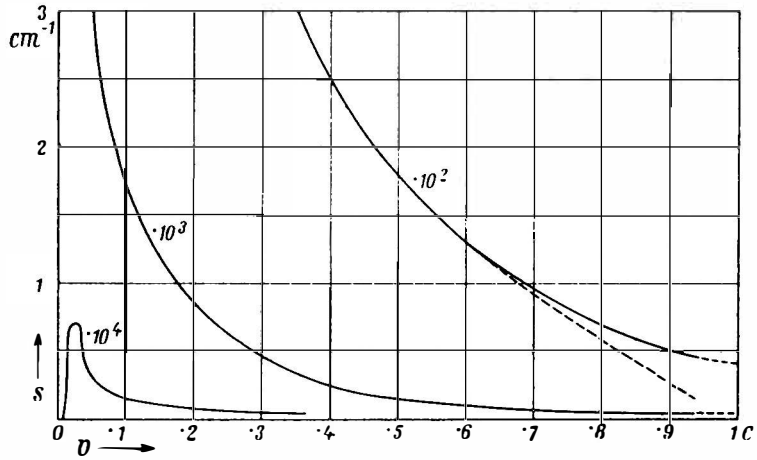


Abb. 115. Differentiale Sekundärstrahlung in Luft bei verschiedener Primärgeschwindigkeit.

der Bezeichnung dieser auf die Wegeinheit bezogenen Sekundärstrahlung besagen. Die Benennung „differential" deutet an, daß wegen Absorption nicht immer unmittelbar mit 1 cm Strahlweg gerechnet werden kann, sondern daß es auf das Verhältnis der auf 1 Primärelektron kommenden Sekundärelektronenzahl zum zugehörigen, genügend kurzen Strahlweg ankommt, auf welchem Intensität und Geschwindigkeit des Primärstrahls merklich ungeändert bleiben.

Die Linie der Sekundärstrahlung, Abb. 115, ist in 3 verschiedenen Ordinatenmaßstäben gezeichnet, entsprechend den beigeschriebenen 3 Faktoren zur links abzulesenden Ordinatenhöhe; der Lauf der Linien zeigt folgendes, was auch für alle Stoffe charakteristisch ist:

Unterhalb einer gewissen, geringen Primärgeschwindigkeit findet überhaupt keine Sekundärstrahlung statt; die Linie beginnt nicht bei 0 sondern bei einer kleinen Geschwindigkeit, die für Luft etwa 11 Volt = 0·006c beträgt und für andere Stoffe nicht sehr verschieden ist. Am höchsten ist sie wohl bei He mit 24 Volt. Man nennt diese Grenzgeschwindigkeit die „Trägerbildungsgeschwindigkeit" oder, ausgedrückt in Volt, die „Trägerbildungsspannung" (siehe 505).

Von dieser Trägerbildungsgeschwindigkeit ab steigt die sekundäre Menge mit wachsender Primärgeschwindigkeit steil an bis zu einem Höchstwert. Der

Anstieg zeigt bei seiner Untersuchung reiner Gase in genügender Verdünnung besondere Stufen. Der Höchstwert liegt bei verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten, bei Luft etwa bei 130 Volt = 0·024c. Hier liefert ungefähr jede Durchquerung, mag sie auch nur streifend sein, ein Sekundärelektron. Letzteres Ergebnis ist auch einer der Nachweise dafür, daß die Elektrizität in den Strahlen tatsächlich in Elektronen abgeteilt vorhanden ist.

Bei den größeren Primärgeschwindigkeiten, bis gegen die Lichtgeschwindigkeit hin, fällt die Sekundärmenge fortdauernd ab; sie ist gegen Null hin gerichtet (punktierte Linie der Abb. 115), bleibt aber doch zuletzt über Null. Letzteres ist als Wirkung großer Geschwindigkeiten der, wenn auch nur wenigen, Sekundärelektronen bei den großen Primärgeschwindigkeiten (493) zu deuten; es befreien diese Sekundärelektronen ihrerseits weitere Elektronen aus Molekülen, was „Tertiärstrahlung" genannt werden kann, die zur Sekundärstrahlung hinzukommt (516).

Das starke Herabsinken der Sekundärstrahlung bei den hohen Geschwindigkeiten zeigt, daß die hier sehr häufigen Atomdurchquerungen zu allermeist ohne Sekundärstrahlung stattfinden.

495. Tritt ein Kathodenstrahl in einen unbegrenzten Gasraum, so können alle seine Elektronen, auch die unecht absorbierten, durch Reflexion aus dem Strahl ausgeschiedenen, fortdauernd Sekundärstrahlung erzeugen, bis sie schließlich alle echt absorbiert sind. Die Elektronenzahl, die auf diese Weise von je einem Primärelektron freigemacht wird, heißt „totale" Sekundärstrahlung. Sie kann wegen der verwickelten Einzelbahnen der Elektronen und deren Geschwindigkeitsverlusten nicht einfach aus der direkten differentialen Sekundärstrahlung (494) berechnet werden; wohl aber ist sie leicht der Messung zugänglich. Sie steigt mit zunehmender Primärgeschwindigkeit dauernd stark an (vgl. 497).

Ein Kathodenstrahl im Gas, wie etwa der in Abb. 103 (444) nach Beobachtung am Phosphoreszenzschirm dargestellte, ist stets umgeben von einem Schwarm unecht absorbierter Primärelektronen und deren Sekundärelektronen, die aber am Phosphoreszenzschirm und auch (bei nicht sehr langer Einwirkung) auf einer photographischen Platte unmerklich bleiben, weil sie zu wenig dicht und ganz uneinheitlich gerichtet, auch teils zu langsam sind; nur mit dem Elektrometer sind sie verfolgbar.

496. An festen Körpern ist die Sekundärstrahlung nicht so leicht exakt quantitativ verfolgbar wie bei den Gasen, weil nur ein Teil der Sekundärelektronen aus der bestrahlten Oberfläche entweichen kann. Bei günstiger Primärgeschwindigkeit kann aber dieser Teil so groß sein, daß mehr Sekundärelektronen entweichen als Primärelektronen festgehalten werden; es tritt dann der merkwürdige Fall ein, daß eine von Kathodenstrahlen getroffene Platte nicht negative, sondern positive Ladung annimmt. Will man Kathodenstrahlintensitäten (489) mit dem Elektrometer messen, so muß man sie daher stets in die Öffnung eines metallischen Hohlraumes eintreten lassen, der alle an seinen Innenwänden ausgelöste Sekundärstrahlung sowie reflektierte und zurückdiffundierte Primärstrahlung zusammenhält und am Entweichen verhindert. In dieser Weise, mit Zuhilfenahme eines Gehäuses, ist auch bereits der erste einwandfreie Nachweis der negativen Ladung der Kathodenstrahlen ausgeführt worden (456).

497. Verbleib der Energie der Kathodenstrahlen. — Wenn ein Kathodenstrahl in einen Hohlraum mit genügend dicken Wänden oder in eine unbegrenzte Gasmenge gelangt, so geht die kinetische Energie seiner Elektronen und Sekundärelektronen durch Geschwindigkeitsverluste und zuletzt durch echte Absorption allmählich verloren; sie findet sich dann als Energie der Wärmebewegung der Moleküle. Die so erfolgende Wärmewirkung der Kathodenstrahlen war lange schon bekannt (441). Ehe aber dieses Endergebnis erreicht wird, treten bemerkenswerte andere Verteilungen der Energie auf, die besonders zu betrachten sind:

Die Energie der Geschwindigkeitsverluste (488) findet sich zum Teil als kinetische Energie der Sekundärelektronen wieder. Es ist hier, wie bei der lichtelektrischen Wirkung (471) kein Zeichen dafür vorhanden, daß die Energie der Sekundärelektronen etwa aus den Atomen stamme, aus denen sie entweichen sind, und es genügen auch die Energieverluste der Primärelektronen bei den die Sekundärstrahlung bewirkenden Durchquerungen (488) zur Lieferung der geringen kinetischen Energie der Sekundärstrahlung. Es zeigte sich bei der Messung der totalen Sekundärstrahlung (495, bei Primärgeschwindigkeiten bis zu $0{\cdot}4c$), daß durchschnittlich für je 32 Volt Geschwindigkeitsverlust eines Primärelektrons ein Sekundärelektron frei wird, und da die kinetische Energie des letzteren durchschnittlich unter 10 Volt ist (493), bleiben sogar noch über 20 Volt vom Geschwindigkeitsverlust für andere Energieleistungen übrig.

Von den anderen bekannten Energieleistungen der Kathodenstrahlen in Materie, neben der Wärmewirkung, ist Wellenaussendung noch besonders zu betrachten und zwar sowohl Aussendung brechbarer — sichtbarer und ultravioletter — Wellen (498) als auch Aussendung der unbrechbaren Hochfrequenzstrahlen (499—502).

498. Lichterregung durch Kathodenstrahlen. — Von Kathodenstrahlen durchsetzte Gase leuchten; das Glimmlicht an den Kathoden der Entladungsröhren (439) ist von den Kathodenstrahlen erleuchtetes Gas, und auch am Fenster der Entladungsröhre Abb. 101 findet man die Luft leuchtend (442). Auch Fluoreszenzen und Phosphoreszenzen flüssiger und fester Körper werden von Kathodenstrahlen erregt (440, O 115).

Da die Leuchterregung eines Atoms durch Elektronenverschiebung bedingt sich gezeigt hat (O 115), ist es verständlich, daß Kathodenstrahlen, welche Elektronen aus Atomen sogar herausbefördern können, wie es die Sekundärstrahlung zeigt, auch Leuchterregung bewirken können.

Zur Leuchterregung durch Kathodenstrahlen ist — wie für die Sekundärstrahlung (494) — eine bestimmte Mindestgeschwindigkeit des Elektrons erforderlich. Es muß die in Volt zu bemessende Energie des erregenden Elektrons wohl mindestens gleich sein dem Energiequant der betreffenden, zu erregenden Wellenlänge, entsprechend dem quantenmäßigen Arbeiten der Atome, das auch sonst — und besonders bei der Wellenaussendung — sich gezeigt hat (W 181). Je schneller die Elektronen, desto kürzere Wellen können sie demnach zur Aussendung bringen. Für sichtbares Licht genügen schon wenige Volt Geschwindigkeit.

Der auf Wellenaussendung kommende Teil der Kathodenstrahlenergie ist im ganzen nicht groß, soweit bekannt.

499. Entstehung von Hochfrequenzstrahlen. — Besonders bemerkenswert sind die äußerst kurzen Wellen, die von schnellsten Kathodenstrahlen in Materie zur Aussendung gebracht werden. Die Wellenlängen liegen hier um 10^{-8} cm[1]) herum; sie sind somit 10000-mal kürzer als die Wellen des sichtbaren Lichtes; ihr Platz in der Gesamtskale der Ätherwellen (s. Abb. 95, 430) ist weit jenseits des Ultraviolett der Bogen- und Funkenentladungen. Entsprechend hoch sind die Schwingungszahlen, weshalb für diese Wellenstrahlen der Name „Hochfrequenzstrahlen" passend ist[2]). So kurzwellige Strahlen waren lange unbekannt gewesen, bis sie bei Beobachtungen an intensiven schnellen Kathodenstrahlen entdeckt wurden (1895). Treffen solche Kathodenstrahlen auf stark absorbierende feste Körper, z. B. Platin, so werden die Atome dieser Körper zur Aussendung der Hochfrequenzstrahlen erregt. Da diese Strahlen verhältnismäßig wenig absorbierbar sind, können sie auch aus dem Inneren einer Entladungsröhre durch die Glaswand herausdringen und außen an einem Phosphoreszenzschirm nachgewiesen werden.

Eine Erzeugungsröhre für diese Strahlen muß, deren Entstehungsweise entsprechend, gegenüber der Kathode den absorbierenden Körper — „Antikathode" genannt — enthalten; wendet man eine Glühkathode an (476), was am zweckmäßigsten ist, weil dann ununterbrochene Aussendung der Strahlen erfolgen kann, so ist die Röhre vollkommen gasfrei zu pumpen.

500. Der Nachweis der Wellennatur der Hochfrequenzstrahlen und die Ermittelung ihrer Wellenlängen erfolgte in derselben Weise wie beim sichtbaren Licht, durch Interferenz und Beugung (1912), was wir bereits behandelt haben (O 160). Mit der Kürze der Wellen stimmt auch die große Geschwindigkeit der Elektronen, die zur Erregung nötig ist im Sinne des quantenmäßigen Arbeitens der Atome (W 181). Das zur Wellenlänge $\lambda = 0{\cdot}0000001$ mm ($= 0{\cdot}1\,\mu\mu$) also zur Schwingungszahl $n = c/\lambda = 3 \cdot 10^{18}$/sek gehörige Energiequant ist $hn = 2 \cdot 10^{-8}$ erg, und diese Energiemenge besitzt ein Elektron als kinetische Energie bei 12600 Volt Geschwindigkeit[3]). Bei der 10-fachen Spannung, 126000 Volt, wäre die zehnmal kürzere Wellenlänge $0{\cdot}01\,\mu\mu$ erreichbar, von Energieverlusten abgesehen. Daß mit solchen Spannungen die betreffenden Wellenlängen tatsächlich hervorgebracht werden können, dies zeigt an, daß die ganze kinetische Energie eines Elektrons dazu erforderlich ist, nicht etwa nur teilweiser Geschwindigkeitsverlust, d. h. daß echte Absorption der Elektronen (492) Anlaß der Aussendung dieser kürzesten Wellen ist. Längere Wellen, die tatsächlich auch bei schnellen Strahlen immer die kürzeren begleiten, können

[1]) $10^{-8}\,\text{cm} = 10^{-7}\,\text{mm} = 0{\cdot}1\,\mu\mu$ wird auch 1 Angströmeinheit genannt.

[2]) Von den Medizinern, die wegen der Knochenschatten sogleich eine Wichtigkeit der Entdeckung der Strahlen (durch W. Röntgen) begriffen haben, wurde der Name „Röntgen-Strahlen" vorgeschlagen und in Gebrauch genommen. Für Mediziner sind die Strahlen Werkzeug, nicht Naturding, und sie benennen viele ihrer Werkzeuge und Hilfsmittel nach Menschennamen. Naturvorgänge, auch Naturgegenstände von mehr als technischer Bedeutung nach Menschen zu benennen, erscheint aber unpassend. Die Benennungen „Galvanischer", „Voltascher", „Faradischer" Strom für elektrische Ströme verschiedenen Ursprungs sind verlassen worden; Jupiters Monde werden lange nicht mehr die „Mediceischen Gestirne", auch der Planet Uranus nicht mehr „Herschel" genannt, und die Strahlen der radioaktiven Körper bezeichnet man kaum mehr als „Becquerel-Strahlen", seit man ihre Natur kennt.

[3]) Siehe die Rechnung im Anhang E VI c.

auch bei Durchquerungen erregt werden oder sie gehören der Absorption von Elektronen zu, die vorher Geschwindigkeitsverluste erlitten haben.

501. Die Eigenschaften dieser kurzen Ätherwellen, ihre Unbrechbarkeit[1]) im Zusammenhang mit ihrer geringen Absorption, haben wir teilweise schon in der Optik erwähnt (O 88). Die Absorption ist im allgemeinen um so geringer, je kürzer die Wellen sind. Doch gibt es auch selektive Absorption im Gebiete dieser kurzen Wellen; sie hängt mit dem Vorhandensein mitschwingungsfähiger Teile bestimmter Schwingungszahlen in den Atomen zusammen, was auch dadurch angezeigt ist, daß für die stark absorbierten Wellenlängen auch starke selektive Emission besteht (502). Im übrigen absorbieren die verschiedenen Stoffe ungefähr nach dem Gewicht, fast wie bei den Kathodenstrahlen (448); es entspricht dies der Kürze der Wellen, die teils kleiner sind als Atomdurchmesser, so daß die Atome durch ihre bei allen Atomen einheitlichen Bestandteile mit den Wellen zusammenwirken (vgl. 451).

Daß Hochfrequenzstrahlen gleich Ultraviolett lichtelektrische Wirkung ausüben, haben wir schon bemerkt, auch daß die freigemachten Elektronen der Kürze der Wellen entsprechende hohe Geschwindigkeiten haben (473). Mittels dieser freigemachten Elektronen machen die Strahlen die Luft in derselben Weise leitend wie die schnellen Kathodenstrahlen am Aluminiumfenster der Entladungsröhre (455, 505, vgl. 507). Vergleicht man die lichtelektrische Wirkung der Hochfrequenzstrahlen mit ihrer Entstehungsweise, so bemerkt man, daß diese beiden Vorgänge die Umkehrung von einander sind. Bei der Entstehung fährt ein Elektron in die Materie und die Welle tritt aus; bei der lichtelektrischen Wirkung fährt die Welle hinein und das Elektron tritt aus.

Erregung sichtbarer Fluoreszenz und Phosphoreszenz, welche die Hochfrequenzstrahlen ebenfalls mit dem Ultraviolett gemeinsam haben, war und ist neben der photographischen Wirksamkeit ihr vorzüglichstes Nachweismittel. Die Leuchterregung ist nicht so sehr direkte Wirkung der kurzen Wellen auf die Fluoreszenz- oder Phosphoreszenzzentren (O 109), sondern sie wird zumeist vermittelt durch die von den Wellen im Phosphor lichtelektrisch ausgelösten schnellen Elektronen, welche wie von außen kommende Kathodenstrahlen erregend wirken (über Erregung hochfrequenter Fluoreszenz s. 502).

502. Über die Aussendung der Hochfrequenzstrahlung von der Antikathode (499) ist folgendes bekannt. Spektrale Zerlegung mit den Kristallgittern (O 160) zeigt, daß die auftreffenden Kathodenstrahlen gleichzeitig zweierlei Strahlung erregen: Das Spektrum besteht aus einem kontinuierlichen Grund und aus Liniengruppen; es ist darin ähnlich den Flammenspektren der Alkalien (O 77), die ihre Linien auch auf ununterbrochen erhelltem Grunde zeigen.

Das kontinuierliche Spektrum hat nach der kurzwelligen Seite hin eine scharfe Grenze; dies entspricht, samt der Wellenlänge dieser Grenze, in der bereits angegebenen Weise (500) dem quantenmäßigen Arbeiten der Atome. Da dieses Spektrum mit seiner Grenze unabhängig ist vom Stoff der Antikathode, nur abhängig von der Geschwindigkeit der erregenden Elektronen, muß es dem plötzlichen Zurruhekommen des Elektrons beim Absorptionsvorgang zugehören. Dieses Zurruhekommen ist, wie wir sahen (483), in der Tat

[1]) Es wurden Brechungsexponenten ganz wenig unter 1 gefunden, was vollkommen mit dem Lauf der Linie n in Abb. 38, Bd. III (O 88) bei kurzen Wellen übereinstimmt.

verbunden zu erwarten mit der Ablösung von Kraftlinienteilen des Elektrons, die mit Lichtgeschwindigkeit weiterfahren und die wir für einen Grenzfall durch Abb. 112 d (483) dargestellt haben. Dieses Kraftliniengebilde gleicht in akustischer Analogie einem Knall in der Luft; es ist ein kurzer Wellenstoß im Äther, und eine Übereinanderlagerung solcher Gebilde, wie sie bei Absorption eines Elektronenstrahlbündels entstehen muß, kann spektral zerlegt — d. i. in eine Summe von Sinuswellen zerlegt, wie ein Geräusch in Töne zerlegbar ist (A 67), — sehr wohl das kontinuierliche Spektrum geben mit einer kürzesten Wellenlänge als Grenze, stammend vom schnellsten Elektron.

Das Linienspektrum, das man über den kontinuierlichen Grund gelagert findet, besteht aus kleinen, serienmäßigen (O 82) Liniengruppen, die man von den kurzen Wellen angefangen mit den Buchstaben K, L, M ... bezeichnet. Die Wellenlängen der Linien sind ganz durch den Stoff der Antikathode bestimmt, und zwar kommt es nur auf die vorhandenen Atome an, ganz oder sehr nahe ohne Rücksicht auf molekulare oder chemische Bindung. Jedem Element gehört eine besondere K, L ... Gruppe zu. Die Wellenlängen gleichbezeichneter Gruppen der verschiedenen Elemente sinken mit steigendem Atomgewicht, die Schwingungszahlen steigen also mit dem Atomgewicht. Genauer als mit dem Atomgewicht ist der Zusammenhang mit der Ordnungszahl der Atome (M 23, s. die kleinen Zahlen bei den Elementzeichen in der Atomtabelle, 570); die Schwingungszahlen sind — mit sehr geringer Abweichung — proportional den Quadraten der Ordnungszahlen.

Wegen dieser Zusammenhänge wird die Hochfrequenz-Linienstrahlung auch „charakteristische Strahlung" genannt; sie ist charakteristisch für das strahlende Element. Aus ermittelter Wellenlänge ist bei unbekanntem Stoff der Antikathode sogleich die Ordnungszahl und damit auch die Art der strahlenden Atome zu erschließen, was bei der Unabhängigkeit von chemischen Bindungen eine Hochfrequenz-Spektralanalyse ergibt, die der alten Spektralanalyse der sichtbaren Wellen (O 78) an Bedeutung verwandt ist.

Der Zusammenhang mit der Ordnungszahl zeigt an, daß die Hochfrequenzlinien Eigenperioden der betreffenden Atome zugehören müssen, und die Linienaussendung trotz festen Aggregatzustandes und unabhängig von molekularen und Atom-Bindungen zeigt an, daß diese Eigenperioden ihren Sitz im Inneren der Atome haben. Es folgt dies aus den schon in der Optik ausgeführten Überlegungen (O 81, 105).

Die Hochfrequenz-Linienspektren sind, außer durch die genügend schnellen Kathodenstrahlen, auch durch Hochfrequenzstrahlen erregbar, was ganz analog den sichtbaren Fluoreszenzen ist, die ebenfalls sowohl durch Kathodenstrahlen als auch durch Licht erregbar sind. Aus diesem Grunde wird die Hochfrequenz-Linienstrahlung auch „Fluoreszenz-Strahlung" der Elemente genannt. Es gilt hier die bereits in der Optik behandelte Regel (O 104), daß die erregten Wellen länger sind als die erregenden.

Elektrizitätsleitung in Gasen.

503. Übersicht. — Leitende Gase fanden wir in den Flammen (4), im elektrischen Funken (27) und Bogen (219), bei der Spitzenentladung (57), am Aluminiumfenster der Entladungsröhre (455), bei Wirkung von ultraviolettem

Licht (470) oder von Hochfrequenzstrahlen auf Luft (501), und sie findet sich auch noch in anderen Fällen.

In allen Fällen ist als Ursache der Leitfähigkeit das Vorhandensein beweglicher, elektrische Ladung tragender Teilchen in den Gasen genügend nachgewiesen. Wir nennen diese Teilchen „Elektrizitätsträger" oder kurz „Träger". Ihre Natur war lange fraglich, bis es möglich wurde, ihre Größe und ihre Beschaffenheit in vielen Fällen eingehend zu untersuchen (s. 504, 508). In allen Fällen ist schließlich auch die Bildungsweise der Träger feststellbar geworden, nachdem die Untersuchungen über Kathodenstrahlen genügend weit vorgeschritten waren (514). Oft können die Träger sogar sichtbar gemacht werden, insofern sie als komplexe Moleküle dampfkondensierend wirken und somit in verhältnismäßig große Flüssigkeitströpfchen sich verwandeln lassen (516, W 229 u. f.).

Die Kenntnis von der Elektrizitätsleitung in Gasen ist daher gut gesichert, wie die der Leitung in den Elektrolyten (186). Beide Fälle sind einander auch gleich in der einen Hinsicht, daß die Leitung im Wandern der Elektrizitätsträger im einen, wie der Ionen im anderen Falle besteht. Nur ist die Beschaffenheit und die Entstehungsweise der Träger in den Gasen sehr viel mannigfaltiger als die der Ionen der Elektrolyten (514, 515), und daher nimmt die Leitung in den Gasen auch sehr verschiedenartige Formen an, die wir im folgenden in wichtigen charakteristischen Einzelfällen betrachten (505—514). Überhaupt werden wir die Grundkenntnisse von der Elektrizitätsleitung in Gasen der Reihe nach aus solchen, gut untersuchten Einzelfällen entwickeln.

Durch die Untersuchung der Elektrizitätsleitung in Gasen ist man auch der Kenntnis von der gewöhnlichen, metallischen Leitung etwas näher gekommen (511).

504. Die Größenermittelung der Träger erfolgt durch Messung ihrer Wanderungsgeschwindigkeit in bekanntem elektrischem Feld und durch Rechnung nach der schon in der Wärmelehre behandelten Gleichung, welche die Wanderungsgeschwindigkeit mit der Größe und der Masse der Träger verbindet, wie dies dort bereits erläutert worden ist (W 109).

Zur Messung der Wanderungsgeschwindigkeit gibt es eine Reihe verschiedener Wege, die in vielen Fällen mit übereinstimmenden Ergebnissen vergleichend benutzt sind. Meist beruhen sie auf der Übereinanderlagerung der zu ermittelnden Wanderungsgeschwindigkeit mit einer bekannten Geschwindigkeit des Gases. Wir erläutern dies an geeigneten Stellen in charakteristischen Beispielsfällen (507, 510). Die Ergebnisse über Trägergrößen bringen wir unter 508 und 514.

505. Trägerbildung durch Sekundärstrahlung. — Ein einfaches und durch eingehende Untersuchung aufklärend gewordenes Beispiel von Leitfähigkeitserregung, d. i. von Trägererzeugung in Luft hat man am Aluminiumfenster der Entladungsröhre, Abb. 101 (442, 455), wo Kathodenstrahlen in die Luft treten.

Da die Elektronen der Strahlen in nicht großem Abstand vom Fenster zuletzt alle echt absorbiert werden (492), erzeugen sie ebensoviele negative Träger, jeder in diesem Falle offenbar bestehend aus einem Luftmolekül, das ein absorbiertes Strahlelektron und dann — wie die Größenmessung der Träger zeigt —

noch einige weitere Moleküle angelagert hat (508). Die so mit ausschließlich negativen Trägern versehene Luft würde nur positiv geladene Leiter entladen können durch Heranwandern der Träger, nicht negativ geladene, sie würde „unipolar" leiten. Dies ist aber am Aluminiumfenster nicht der Fall; sondern beide Elektrizitäten werden in der bestrahlten Luft merklich gleich gut entladen (455). Dies erklärt sich aus der Kenntnis der Sekundärstrahlung (493u.f.). Jedes aus dem Aluminiumfenster kommende Elektron macht auf seinem Wege durch die Luft, bei den Durchquerungen der Luftmoleküle, fast 1000 Sekundärelektronen aus denselben frei (totale Sekundärstrahlung, 495), die dann an Molekülen absorbiert werden. Diese Moleküle werden dadurch negative Träger, während die anderen Moleküle, welche die Elektronen verloren haben, positive Träger sind. So sind in der Luft so viel Trägerpaare der beiden Vorzeichen, als Sekundärstrahlungen stattgefunden haben, wogegen der sehr geringe, von der Primärstrahlung stammende Überschuß negativer Träger unmerklich wird. Die von der Sekundärstrahlung stammende, große Trägermenge ist es also, welche die durchstrahlte Luft so gut leitend macht.

Diese trägerbildende Wirkung können Kathodenstrahlen nur haben, wenn ihre Geschwindigkeit oberhalb derjenigen Grenze liegt, welche wir bereits als Trägerbildungsspannung bezeichnet haben; denn unterhalb dieser Grenze fehlt die Sekundärstrahlung, also auch die Trägerbildung (494).

Das Leitvermögen des Gases bleibt auch eine Zeitlang nach der Bestrahlung noch erhalten; man kann die Luft aus dem Bestrahlungsraum herausblasen und findet sie immer noch gut leitend. Dies zeigt, daß die Wiedervereinigung der Träger beiderlei Zeichens Zeit braucht; obgleich sie einander anziehen, können sie doch, getrennt durch elektrisch neutrale Gasmoleküle, nur langsam zur Vereinigung kommen. Die Geschwindigkeit der Wiedervereinigung hängt von der Größe der Träger ab, die je nach Umständen verschieden sein kann (508 u. f.); je kleiner die Träger sind, desto schneller können sie unter dem Einfluß der Anziehungskräfte wandern und desto schneller kommen sie zur Wiedervereinigung.

Wegen der Wiedervereinigung steigt die Zahl der Träger in der Volumeinheit bei fortdauernder Erzeugung derselben nur bis zu einer gewissen Grenze, die stets sehr niedrig ist. Es kommt selbst dicht am Aluminiumfenster oder nahe bei stark radioaktiven Stoffen kaum vor, daß unter 10^{10} Molekülen mehr als 1 Trägerpaar vorhanden ist. In Elektrolyten ist die Zahl der Ionen außerordentlich viel größer; daher leiten diese Flüssigkeiten auch trotz der geringen Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen (196) viel besser als Gase.

506. Träger entstehen anders als Ionen. — Die geschilderte Entstehungsweise der Träger auf dem Wege der Sekundärstrahlung ist gut nachgewiesen durch die eingehende Untersuchung der Sekundärstrahlung in verdünnten Gasen (493 u. f.). Es sind dabei die freigewordenen Sekundärelektronen noch vor ihrer Absorption nachweisbar, und besonders ist der Beweis erbracht, daß die Wirkung der Primärelektronen auf das Gas nicht etwa Spaltung von Molekülen in entgegengesetzt geladene Atome oder Atomgruppen ist. Ebenso ist auch in anderen Fällen Elektronenbefreiung aus den Molekülen, niemals aber Molekülspaltung als Anlaß von Leitvermögen in Gasen gefunden worden (514). Die Träger in Gasen entstehen also anders als die Ionen der Elektrolyten (199). Die Unterscheidung von freien Elektronen und von geladenen Atomen oder Molekülen ist bei diesem Nachweis durch den Phosphoreszenzschirm geliefert, von dem gezeigt ist, daß er nur durch genügend beschleunigte Elektronen, nicht aber beim gleichen beschleunigenden Felde durch materielle Träger zum Aufleuchten kommt.

507. Trägerbildung durch Wellenstrahlung. — Auch durch genügend absorbierbares ultraviolettes Licht und durch Hochfrequenzstrahlen werden Gase leitend (470, 501)[1]. Die Elektronen entweichen dabei durch Resonanz aus den Gasmolekülen (vgl. O 92). Es ist damit wieder (506) die Entstehung positiver und negativer Träger verbunden; denn das entwichene Elektron bildet, an einem Gasmolekül absorbiert, den negativen Träger, während das Molekül, aus dem das Elektron entwichen ist, positiver Träger geworden ist.

Bei den Hochfrequenzstrahlen ist die Zahl der von ihnen lichtelektrisch freigemachten Elektronen nicht sehr groß; aber die Elektronen haben große Geschwindigkeiten (473), und es erzeugt daher jedes derselben durch Sekundärstrahlung eine sehr große Zahl von Trägern (495), was die Leitfähigkeitswirkung viel stärker macht als bei der geringen Absorbierbarkeit der Hochfrequenzstrahlen erwartet werden könnte.

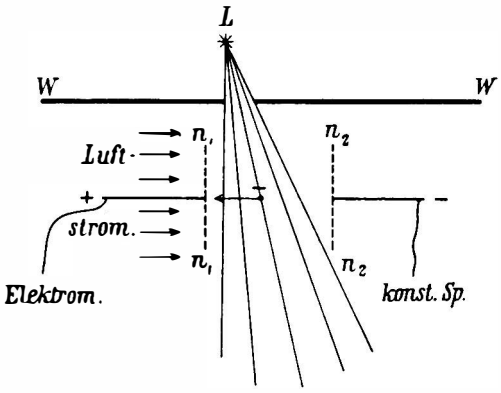


Abb. 116. Messung der Wanderungsgeschwindigkeit der Träger in ultraviolett durchstrahlter Luft.

Ein Beispiel der Wanderungsgeschwindigkeitsmessung von Trägern zeigt hier für den Fall der Wirkung ultravioletten Lichtes Abb. 116. L ist die Lichtquelle, WW ein undurchsichtiger Schirm, der ein Bündel des Lichtes abgrenzt, innerhalb dessen die Trägerbildung stattfindet. n_1 und n_2 sind zwei leitende Netze, die außerhalb des Lichtbündels stehen; n_2 ist dauernd negativ geladen, n_1 wird durch Influenz positiv und ist mit einem Elektrometer oder Elektroskop verbunden. Infolge der Zuwanderung negativer Träger (deren einer in der Abbildung mit dem Pfeil bezeichnet ist), zeigt das Elektrometer steigenden negativen Ausschlag. Bläst nun ein Luftstrom (mittels Ventilators) durch die Netze in Richtung gegen die Wanderung der negativen Träger, wie es die Pfeile in der Abbildung anzeigen, und steigert man die Luftgeschwindigkeit so weit, daß das Elektrometer eben zum Stillstand kommt, so ist die Luftgeschwindigkeit gleich der gesuchten Wanderungsgeschwindigkeit der negativen Träger; die letzteren wandern zwar immer noch in der sie umgebenden Luft; sie ruhen aber relativ zu den Netzen, kommen also nicht ans Elektrometer. Mißt man die Luftgeschwindigkeit, etwa mit einem kleinen Anemometer, so hat man auch die Wanderungsgeschwindigkeit der Träger.

508. Größen der Träger. — Die Wanderungsgeschwindigkeit der Träger zeigt sich immer wie bei den Ionen der Elektrolyse proportional der Feldstärke. Letztere wird in Volt/cm aus der Spannung und dem Abstand der benutzten Leiter (im Beispiel der Abb. 116 der Netze n_1 n_2) gefunden. Der Quotient aus Wanderungsgeschwindigkeit und zugehöriger Feldstärke erlaubt dann die Berechnung der Trägergrößen (504). Wanderungsgeschwindigkeitsmessungen

[1]) Dies ist wohl auch der Ursprung der ziemlich guten Leitfähigkeit der oberen Schichten der Erdatmosphäre, in welche das kurzwellige Ultraviolett der Sonne (O 98), außerdem wohl auch Kathodenstrahlung von der Sonne (576) herabdringen kann (577).

verschiedener Art, deren viele in großer Verfeinerung bei verschiedenen Trägerbildungsweisen ausgeführt worden sind, ergaben für die Wanderungsgeschwindigkeit der negativen Träger in gewöhnlicher, reiner, nebelkernfreier Luft 1·8 cm/sek für 1 Volt/cm, was als Trägerradius $0{\cdot}48 \cdot 10^{-6}$ mm berechnen läßt. Da der Radius der Luftmoleküle (N_2, O_2) nur $0{\cdot}15 \cdot 10^{-6}$ mm ist (vgl. Tab. 1 in Bd. I), entspricht dies der Zusammenlagerung mehrerer Moleküle im Träger. Die positiven Träger zeigen sich noch etwas größer (vgl. 512)[1]). In unreiner, besonders in nebelkernhaltiger Luft können auch sehr viel größere Träger gefunden werden, die als Zusammenlagerung der kleinen Träger mit den Verunreinigungen — Nebelkernen, W 229 u. f. — aufzufassen sind (514).

509. Bei der lichtelektrischen Wirkung auf feste Metalle in Luft (474), wo längerwelliges Ultraviolett, das die Luft selbst nicht leitend macht, Elektronen aus der Metalloberfläche befreit, kommt es auf das Zusammenwirken dieser Elektronen mit der Luft an. Da die lichtelektrisch befreiten Elektronen sehr geringe Geschwindigkeiten haben (468), die unterhalb der Trägerbildungsgeschwindigkeit (494) liegen, können sie die Luft nicht leitend machen (505); sie werden bloß in derselben absorbiert und können dann unter dem Einfluß des elektrischen Feldes der negativ geladenen Metalloberfläche als Träger weiterwandern. Bei der geringen Wanderungsgeschwindigkeit häufen sich die Träger in der Nähe der Plattenoberfläche und verringern dadurch das Feld, weshalb die lichtelektrische Wirkung in Luft von Atmosphärendruck geringer erscheint als im Vakuum.

Ist aber die Luft genügend verdünnt, so können die Elektronen vor ihrer Absorption genügend lange Wege frei beschreiben (vgl. Note zu 444), auf denen sie durch das Feld so weit beschleunigt werden, daß sie Sekundärstrahlung in der Luft bewirken können, was sofort eine große Anzahl von Trägern gibt, so daß dann die entladende Wirkung des Lichtes sogar stärker ist als im Vakuum. Je geringer der Gasdruck, desto geringere Spannungen genügen schon, um diese verstärkende Wirkung zu geben, weil dann um so längere freie Wege der Elektronen zur Erreichung der Trägerbildungsgeschwindigkeit zur Verfügung stehen.

Daß bei positiver Ladung die lichtelektrische Wirkung fehlt, obgleich entweichende Elektronen, die dann wieder zurückkehren (468), das Gas durchsetzen, dies ist aus der geringen, unterhalb der Trägerbildungsgeschwindigkeit liegenden Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen unmittelbar zu verstehen.

510. Trägerbildung in heißen Gasen. — Gut leitend sind heiße Gase, besonders Flammen. Es ist aber nicht der chemische Vorgang an sich das besonders Wirksame in den Flammen; denn in kalter chemischer Umsetzung befindliche Gase, wie beim Vorgang $2\,NO + O_2 = 2\,NO_2$, bleiben nichtleitend. Sondern es dürfte die in den sich umsetzenden Molekülen der Flammen „molekular lokal" sehr hohe Temperatur (vgl. W 128) das Wirksame sein. Die hohe Molekulargeschwindigkeit bzw. Atomgeschwindigkeit macht bei den Zusammenstößen Elektronen aus den Atomen frei. Dies ist besonders durch die Untersuchung der metallhaltigen Flammen eingehend nachgewiesen.

Bringt man an einer Bunsenflamme seitlich zwei Platinplatten oder Netze an, wie es Abb. 117 zeigt, und schaltet man dieselben mit einer Spannungsquelle und einem Galvanometer in einen Leiterkreis, so kann man an der Galvanometerablenkung die Leitfähigkeit der Flamme beurteilen, wozu aller-

[1]) Über die bei äußerster Bemühung zur Fernhaltung von Wasserdampf erhaltenen, ein wenig kleineren Träger s. 514.

dings die zwei Platten dichter als in der Abbildung in den Saum der Flamme zu schieben sind, damit nicht kalte Luft[1]) mit eingeschaltet sei. Man findet, daß das Leitvermögen außerordentlich zunimmt, wenn Dämpfe von Metallsalzen in die Flamme kommen. Beim Einbringen einer Salzperle p, z. B. NaCl, am Platindraht genügt schon eine Spannung von 2 Volt zwischen den Netzen, um an empfindlichem Galvanometer leicht meßbare Ströme hervorzubringen.

Es war daher besonders die Untersuchung metallhaltiger Flammen aussichtsreich, um so mehr, als die Metalldämpfe durch ihre sichtbare Lichtaussendung in der Flamme unmittelbaren Anhalt zur Erkenntnis der Vorgänge geben. Rückt man die Platinnetze etwas aus der Flamme heraus, wie es die Abbildung zeigt, damit hohe Spannung zwischen den Netzen erhalten werden kann, etwa 2000 Volt, so sieht man, daß der von der Salzperle p aufsteigende lichtemittierende Dampfstreifen eine Neigung gegen die negative Platte hin annimmt, wie die Abbildung es darstellt. Dies beweist, daß die Metalldämpfe positive Ladung haben, und dies trifft für alle Art flüchtiger Metallsalze, die man einbringt, zu. Der Spektrallinienaussendung dieser Dämpfe nach können es nur freie Metallatome sein, die im Dampfstreifen sichtbar wandern (O 77), und diesen ist also die positive Ladung zuzuschreiben; sie sind somit die positiven Träger der Leitung der metallhaltigen Flammen.

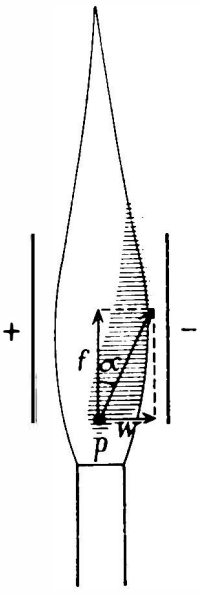


Abb. 117. Elektrische Wanderung der Metallatome in der Flamme.

Negative materielle Träger, die nach der positiven Platte hin wandern müßten, sind nicht zu finden. Man könnte z. B. bei einer NaCl-Perle in der Flamme erwarten, negative Cl-Atome (wie die Ionen der Elektrolyse) an die positive Platte — Anode — kommend zu finden; dieselben wären leicht nachweisbar, wenn ein Kupferdraht als Anode dicht an die Flamme gebracht wird. Der Draht gibt für sich keine Flammenfärbung; jede Spur an den Draht kommenden Chlors zeigt sich aber sogleich durch die grüne Flammenfärbung des flüchtigen Kupferchlorids an. Doch diese Färbung bleibt bei eingebrachter Kochsalzperle und andauerndem Stromdurchgang ganz aus, und auch sonst gelingt kein Nachweis jonenartiger negativer Träger in der Flamme.

Weiteren Aufschluß gibt die Messung der Wanderungsgeschwindigkeit ω (w in Abb. 117) der positiven Metallatome. Dieselbe ist im Dampfstreifen überlagert von der Geschwindigkeit f der aufsteigenden Flammengase, die in verschiedener Weise gut gemessen werden kann; daher ist die Wanderungsgeschwindigkeit sehr einfach durch die Schiefe α des Flammenstreifens gegeben; es ist $\omega = f \tan\alpha$. Man findet in dieser Weise Wanderungsgeschwindigkeiten, die auffallend klein sind. Dichte und Molekulargeschwindigkeit der Flamme sind genügend genau ermittelt, um nach der Wanderungsge-

[1]) Durch das empfindlichere Mittel der Entladung von Elektroskopen ist übrigens die Leitfähigkeit auch bei kaltgewordenen Flammengasen sehr gut nachweisbar; es bleiben einmal gebildete Träger längere Zeit ohne Rückvereinigung in der Luft bestehen (vgl. 505).

schwindigkeitsgleichung (W 109) berechnen zu können, daß dauernd mit 1 Elementarquant positiv geladene, freie Metallatome an 1000 mal schneller wandern müßten als es der Dampfstreifen anzeigt. So verwaschen der Streifen ist, was die Wanderungsgeschwindigkeitsmessung ungenau macht, so ist nach diesem Ergebnis doch der Schluß gut gesichert, daß die Metallatome im Dampfstreifen nicht dauernd positiv geladen und frei sein können.

Dauernd positiv geladene Metallatome müßten auch schon bei geringeren Spannungen an den Elektroden fast horizontal nach der Kathode hin aus der Flamme herauswandern. Man findet, daß dies bei einem geringen Teil der Metallatome auch zutrifft; man kann dieselben an einer seitlich neben der Flamme in Höhe der Perle angebrachten Platinkathode sammeln und dann durch Flammenfärbung nachweisen. Der im Dampfstreifen sichtbare Hauptteil der Metallatome wandert aber viel langsamer als es dauernder Ladung entspräche.

Der hierdurch gegebene Schluß auf intermittierende Ladung ist auch durch viel weitere Untersuchungen der Flammenleitung bestätigt. Es findet demnach dauernder Wechsel der Zustände der Metallatome in der Flamme statt; sie wechseln zwischen geladenem und ungeladenem und wohl auch zwischen freiem und gebundenem Zustand; ja es sind unter Umständen sogar negativ geladene Metallatome durch ihre Wanderung nach der Anode hin nachgewiesen.

Dieser Zustandswechsel der Atome in der Flamme macht die Gesamtvorgänge in ihr ziemlich verwickelt und schwierig untersuchbar. Es ist noch nicht gelungen, die Wanderungsgeschwindigkeit der negativen Träger der Flammen gut meßbar zu machen; nur so viel ist wohl sicher, daß sie außerordentlich groß ist, weit größer, als sie bei irgendwelchen Atomen mit nicht außerordentlich vielfachen Ladungen sein kann. Dies, zusammen mit der schon bemerkten Nichtauffindbarkeit jonenartiger negativer Träger führt zum Schluß, daß die bewegliche negative Elektrizität in Gestalt freier Elektronen in den Flammen vorhanden ist, die allerdings auch wirklich sehr schnell wandern müßten (W 109). Dauernd frei können die Elektronen im Gasgemisch der Flammen allerdings nicht sein (vgl. 512); sie werden nach Festhaltung an Flammenmolekülen und an den positiven Metallatomen, aus welchen sie gekommen waren, offenbar immer wieder neu befreit. Ihrer großen Beweglichkeit ist die gute Leitfähigkeit der Flammen zuzuschreiben, und die besonders erhöhte Leitfähigkeit der metallhaltigen Flammen zeigt somit, daß Metallatome besonders leicht Elektronen abgeben. Der leichte Elektronenverlust der Metallatome entspricht aber auch deren Stellung in der Spannungsreihe (136); die ganz am positiven Ende der Reihe stehenden Alkalimetalle geben die beste Flammenleitung.

Die immer wieder erneute Elektronenabgabe der Metallatome erfolgt, nach Auskunft besonderer Untersuchungen, beim Zusammenstoß mit den Flammenmolekülen; doch ist nur ein sehr kleiner Bruchteil der Zusammenstöße wirksam. Welches die besonderen, für Wirksamkeit der Zusammenstöße erforderlichen Umstände sind, ist noch zu untersuchen; ohne alle chemische Wirkung (ohne molekular-lokale Temperaturerhöhungen) und ohne glühende Wände erhitzte Gase[1]) konnten auch noch nicht genügend untersucht werden.

511. Nähewirkung. — Die Befreiung der Elektronen aus Atomen in den Flammen findet jedenfalls unter großer Annäherung der Atome bei den Zusammenstößen statt. Solche Elektronenbefreiung bei starker Annäherung von Atomen ist auch in den festen Metallen anzunehmen, da deren gute Leitfähigkeit das stete Vorhandensein freier Elektronen in ihnen

[1]) Wie im pneumatischen Feuerzeug (W 61).

anzeigt (vgl. 13)[1]) und da die Leitfähigkeit bei tiefsten Temperaturen sehr stark ansteigt, wo die Molekularkräfte besonders starke Annäherung der Atome hervorbringen und dauernd erhalten, entsprechend der Volumverkleinerung in der Kälte. Da die Elektronenbefreiung hier ganz ohne große kinetische Energie der Atome stattfindet, nennen wir den Vorgang „Nähewirkung". Es dürfte auch in den leitenden heißen Gasen die große Annäherung, zu welcher die Atommittelpunkte bei geeigneten Zusammenstößen kommen, das Maßgebende für die Elektronenbefreiung sein.

Bei Temperaturen *nahe dem absoluten Nullpunkt* greifen die benachbarten Atome in festen Metallen wohl so weit und mangels Wärmebewegung so dauernd ineinander ein, daß nicht nur reichliche Elektronenbefreiung durch Nähewirkung eintritt, sondern daß sogar keines der freien Elektronen von irgendeinem der Atome mehr festgehalten werden kann. Die Elektronen bewegen sich dann innerhalb des Metalles wie in freiem Raum (vgl. 490, 491), nur am Austritt aus der Oberfläche sind sie durch die bei der lichtelektrischen Wirkung erwähnten Kräfte (471) verhindert (vgl. auch 13 u. 53). Ist bei so tiefer Temperatur ein elektrischer Strom etwa in einem ringförmigen Metallstück erregt, was durch Induktion geschehen kann, so bleibt er stundenlang weiterfließend bestehen — seine Wirkung auf eine Magnetnadel zeigt es —; der *Leitungswiderstand ist Null* geworden, weil die freien Elektronen keine Energie an die Metallatome abgeben. Man nennt dies „*Supraleitung*", und man kann sie als Folge der starken Nähewirkung auffassen. Mit dem quantenmäßigen Energieaustausch der Atome (W 181) steht sie insofern in Einklang, als die Schwingungszahl der Atome unter dem Einfluß der bei ihrer großen Nähe sehr großen Kräfte sehr hoch, die Energiequanten also sehr groß sein müssen, so daß vielleicht keines der Elektronen ein ganzes Quant zur Abgabe an ein Atom, zur Beschleunigung desselben, überschüssig hat.

Dieses außerordentliche Verhalten der metallischen Leiter bei tiefsten Temperaturen, von dem noch weitere Eigentümlichkeiten gefunden sind, gibt Anlaß zu fortgesetzten Untersuchungen, die ohne Zweifel Wesentliches über den Vorgang der Leitung sowohl, als auch über die *Natur der Elektronen* lehren werden. Ein neues Eingangstor zu Naturkenntnis ist hier eröffnet. Daß danach auch technische Anwendungen folgen, ist selbstverständlich.

512. *Freie Elektronen in kalten Gasen von gewöhnlichem Druck* finden sich nur in besonderen Fällen, so in reinen *Edelgasen* und in *Stickstoff*. Sind *in* solches Gas freie Elektronen hereingebracht, etwa durch lichtelektrische Wirkung oder durch einen radioaktiven Körper, so können sie im elektrischen Felde durch das Gas wandern, ohne echt absorbiert zu werden, was durch Messung der sehr großen Wanderungsgeschwindigkeit nachweisbar

[1]) Die *freien Elektronen im Metall* sind durch einen besonderen Versuch auch *nachgewiesen*: Es wird ein metallischer Leiter in Richtung seiner Länge schnell bewegt und dann innerhalb kurzer Zeit angehalten. Sind frei bewegliche, träge Teile im Metall, so müssen sie sich beim Anhalten in der Bewegungsrichtung häufen, und haben diese Teile elektrische Ladung, so muß dies elektrische Spannung zwischen den Enden des Leiters ergeben. Es zeigt sich, daß die Spannung tatsächlich auftritt und zwar mit dem gehörigen Zeichen. Aus ihrer Größe, zusammen mit der Länge des Leiters und der Beschleunigungsgröße beim Anhalten ist das Verhältnis von Ladung zu Masse der beweglichen Teile berechenbar. Das so ermittelte Verhältnis ergab sich innerhalb der erreichbaren Genauigkeitsgrenze gleich dem für Elektronen bekannten Verhältnis e/m (454).

ist (W 109). Beigemischter Sauerstoff hält aber die Elektronen fest und gibt die langsam wandernden Träger [1]).

Man sieht, daß in dem Gasgemische einer Flamme nur deshalb stets freie Elektronen vorkommen, weil sie durch Nähewirkung immer wieder neu von den Trägern und den neutralen Atomen losgelöst werden (511). Auch in kalter Luft könnte zeitweiliges, kurzes Freiwerden von Elektronen von den negativen Trägern stattfinden, und es ist vielleicht dies der Grund dafür, daß die stets im Mittel über große Strecken gemessene Wanderungsgeschwindigkeit bei den negativen Trägern etwas größer gefunden wird als bei den positiven (508), für welche solche Abtrennung schnell wandernder Teile nicht in Betracht kommt.

513. Die Erscheinungen in den Entladungsröhren; selbständige Entladung. — Spät und erst aus der Gesamtheit der schon vorgebrachten Kenntnis verständlich wurden die Vorgänge, welche den Erscheinungen in den verdünnten Gasen der Entladungsröhren zugrunde liegen, von deren Studium ursprünglich alle diese Kenntnis ausgegangen war. Das Besondere dieser Gasentladungen, sowie auch der Funken in gewöhnlicher Luft, der Spitzen- und Bogenentladung ist es, daß sie allein nur infolge angelegter Spannung zustandekommen, ohne daß besondere Strahlungen oder Wärmequellen zu Hilfe genommen werden; das Gas wird hier durch bloße Wirkung der Spannung leitend. Man nennt diese Vorgänge daher „selbständige Gasentladung".

Der Ursprung der Leitfähigkeit liegt hierbei stets an der Kathode. Wir betrachten zuerst die Entladungsröhren mit verdünnten Gasen, aus deren Verständnis auch das Weitere folgt.

Die Kathodenstrahlen sind es, die im gasverdünnten Entladungsrohr den Gesamtvorgang der Entladung einleiten, der dann von der Kathode bis zur Anode hin sich ausbreitet. Die Grundfrage betrifft hiernach die Entstehungsweise der Kathodenstrahlen; und nachdem es sichergestellt ist, daß die Elektronen dieser Strahlen von der Kathodenoberfläche ihren Ursprung nehmen (461), bleibt noch die Frage nach der Ursache des Freiwerdens von Elektronen an dieser Oberfläche. Daß diese Ursache Zufälligkeiten unterworfen sein muß, dies zeigt das oft schlechte „Ansprechen" der Entladungsröhren, besonders bei neu beginnender Benutzung: Es sind oft mehrere Spannungsschläge des Induktoriums nötig, bis die Entladung zustandekommt, worauf dann allerdings nicht so leicht mehr Versagen eintritt. Die Erklärung liegt darin, daß vor allem einige positive Elektrizitätsträger im Gasraum vor der Kathode vorhanden sein müssen; fehlen sie, so kann die Röhre nicht „ansprechen". Meist sind sie vorhanden; denn ganz nichtleitend ist die Luft nie; sie enthält immer eine Anzahl von Trägern, herrührend von den verschiedenen, auf der ganzen Erdoberfläche wirksamen Trägererzeugungsvorgängen, von welchen innerhalb der abgeschlossenen Entladungsröhre die Strahlung der radioaktiven Stoffe der Erde (β- und γ-Strahlen, 551, 552) und die aus dem

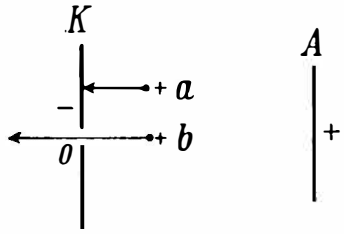


Abb. 118. Entstehung der Kathodenstrahlen und der Kanalstrahlen im Entladungsrohr.

[1]) Sind nur wenige O_2-Moleküle vorhanden, so werden die Elektronen auch von diesen nicht dauernd festgehalten; erst die Zusammenlagerung mehrerer (O_2-)Moleküle (508, 514) scheint die Festhaltung zu sichern.

Himmelsraum kommende „durchdringende Strahlung" (578) in Betracht kommen, die alle wie ultraviolettes Licht und Kathodenstrahlen trägererzeugend wirken. Es sei im Raum vor der Kathode K (Abb. 118) ein positiver Träger a unter den Gasmolekülen vorhanden. Wird Spannung zwischen K und der Anode A hergestellt, so wird der Träger a gegen die Oberfläche von K getrieben, und ist die Spannung genügend hoch, so trifft er mit genügender Geschwindigkeit auf K, um dort Nähewirkung (511) auf ein Atom des Kathodenstoffes auszuüben und ein Elektron aus demselben zu befreien. Damit ist der Gesamtvorgang schon eingeleitet. Denn das Elektron wird mit beschleunigter Bewegung senkrecht von der Kathode (440) — wie die Kraftlinien an ihr enden — abgetrieben, erreicht bald Trägerbildungsgeschwindigkeit (494) und erzeugt dann auf seinem Wege durch das Gas sogleich sehr viele positive Träger durch Sekundärstrahlung, die alle wieder Nähewirkung auf die Kathode ausüben und somit noch weitere Elektronen befreien, die ebenso weiterwirken wie das erste, so daß der Vorgang der Elektronenbefreiung aus der Kathode und damit der Kathodenstrahlerzeugung, ausgelöst durch den ersten Träger, schnellstens in außerordentlicher Vervielfältigung sich auswirkt.

Dies ist die Entstehung der Kathodenstrahlen und damit auch des Glimmlichtes (439, 498) an der Kathode.

Man sieht, daß immer ein kleiner Gasrest zur Entstehung der Kathodenstrahlen und damit überhaupt zur Einleitung der Entladung erforderlich ist, wenn nicht — wie bei der Glühkathode (476) — anderweitig für Elektronenbefreiung aus der Kathode gesorgt ist.

Einen besonderen Nachweis der wesentlichen, auslösenden Mitwirkung ursprünglich in der Umgebung der Kathode vorhandener Träger liefert Hittorfs nach obigem erst spät verständlich gewordenes „Umwegrohr" (Abb. 119), in welchem die Entladung zwischen den beiden drahtförmigen Elektroden nicht auf dem kurzen Wege a k stattfindet, wo sie einander dicht gegenüberstehen, sondern auf dem großen Umweg nach unten, der dabei erleuchtet wird (schraffiert in der Abbildung), während die Umgebung von a k dunkel bleibt. Das Rohr ist mit Luft von etwa 0·1 mm Druck gefüllt; es sind in dem engen Rohr bei a k zu wenig Gasmoleküle vorhanden, als daß noch Träger darunter wären; somit können dort auch keine Kathodenstrahlen entstehen. Wo aber Raum um die Kathode vorhanden ist, wie in der Kugel R, der Träger bieten kann, dort bilden sich Kathodenstrahlen aus, die dann, senkrecht von der Kathodenoberfläche ausgehend, das Gas in der schon angegebenen Weise durch Sekundärstrahlung weiter leitend machen.

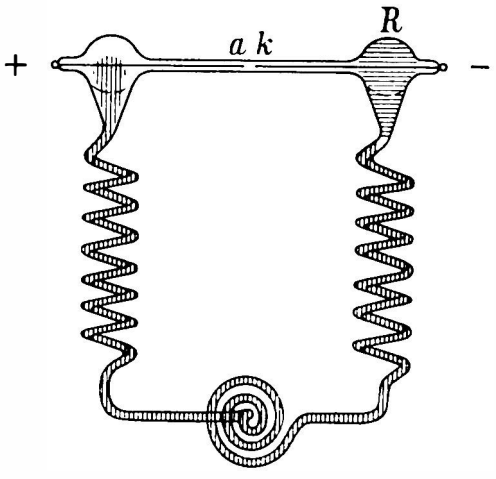


Abb. 119. Hittorfs Umwegröhre.

Einen Nachweis der großen Geschwindigkeit, mit welcher die positiven Träger gegen die Kathode fahren, hat man in den „Kanalstrahlen", die hinter der Kathode verlaufen, wenn dieselbe Öffnungen („Kanäle", o in Abb. 118) hat. Diese Kanalstrahlen, die wir später besonders betrachten (517),

sind positive Träger, wie b in der Abbildung, die als Strahl durch die Öffnungen fahren, sobald Spannung an den Elektroden ist.

Die positive Säule in einem Entladungsrohr entsteht durch die von der Kathode ausgehenden Elektronen mittels schichtenweise wiederholter Sekundärstrahlung im Gas. Jedes nicht echt absorbierte Sekundärelektron der primären Kathodenstrahlen liefert, sobald es im Felde der an die Elektroden gelegten Spannung eine Strecke mit den zur Trägerbildung nötigen wenigen Volt Spannungsunterschied (494) durchlaufen hat, wieder Sekundärelektronen — die man tertiär nennen könnte —, und diese wirken ebenso weiter. In dieser Weise können fast beliebig lange Strecken, vom Glimmlicht bis zur Anode hin, mit Trägern und freien Elektronen erfüllt und also leitend werden. Der Vorgang kann sich auch in sichtbar getrennten Schichten entwickeln (Abb. 98, 439), indem auch das Leuchten des Gases, wie die Trägerbildung, an die Erreichung bestimmter Geschwindigkeiten der Sekundär-, Tertiär- usw. Elektronen gebunden ist (498). Daß Krümmungen des Rohres die Ausbildung der positiven Säule nicht hindern, dies versteht sich wie beim elektrischen Strom in Drähten (93, 125), da der Weg im verdünnten Gase in der angegebenen Weise elektrisch leitend wird, sei es auch nur von Strecke zu Strecke fortschreitend.

Gut sichtbare Ausbildung der positiven Säule erfordert einen geeigneten Gasdruck; ist derselbe zu klein, etwa nur 0·01 mm oder weniger, so sind zu wenig Moleküle zum Leuchten da; ist er zu groß, etwa 10 mm, so werden zu viele Elektronen absorbiert, ehe sie Trägerbildungsgeschwindigkeit erreicht haben (vgl. 509), und es muß die angelegte Spannung erhöht werden, um die Erreichung auf kürzeren Strecken zu ermöglichen, wodurch aber die Schichten unsichtbar dicht zusammenrücken. Dies gibt den Übergang zur Funkenentladung in Gasen von 1 Atm. oder höherem Druck, die hohe Spannung erfordert (34), während bei geeignetem, geringem Gasdruck schon bei Spannungen unter 1000 Volt sehr lange Strecken durchströmt werden können. Stets kommt es darauf an, daß auf Strecken, die ein Elektron frei im Gas durchlaufen kann (vgl. 444, Note), die Trägerbildungsgeschwindigkeit erreicht werden muß. Ist die Bedingung für die ganze Strecke von Elektrode zu Elektrode erfüllt, so erfolgt schnelle Entladung; ist sie nur an den Elektroden oder an einer Elektrode erfüllt, wo das Feld besonders stark ist, so erfolgt die langsame Spitzenentladung (57). Das sehr starke Feld an einer Spitze ist Folge der großen Oberflächendichte (54). Es kommt an einer negativen Spitze leicht durch Nähewirkung zum Elektronenaustritt, wie an der Kathode der Entladungsröhre, und die schnell beschleunigten Elektronen machen das Gas der Umgebung durch Sekundärstrahlung leitend. In weiterer Entfernung von der Spitze ist aber das Feld zu schwach für erneute Sekundärstrahlungen, so daß die Elektrizitätsleitung dort nur durch Wandern der schon gebildeten Träger ihre Fortsetzung finden kann. An positiver Spitze kann die Elektronenbefreiung nur durch Nähewirkung schnell gegeneinander bewegter Träger stattfinden, und da diese Träger nicht metallischer Natur sind, verlieren sie schwerer Elektronen als die metallische Spitze; daher erfordert das Ausströmen aus positiven Spitzen höhere Spannung als aus negativen. Das erste Einsetzen einer Spitzenentladung bei allmählich steigender Spannung ist stets etwas launenhaft, weil es vom zufälligen Vorhandensein günstiger Träger nächst der Spitze abhängig ist.

Bei Einschließung der Spitze in ein Gehäuse mit Erdableitung, in welches nicht beliebige Träger Zutritt haben, kann eine Spitze auf hoher Spannung — z. B. 1000 oder 1500 Volt negativ — gehalten werden, ohne daß Entladung eintritt. Kommen dann irgendwie auch nur wenige Träger ins Gehäuse, so tritt sofort Entladung ein, indem die schon für die Kathodenstrahlerzeugung im Entladungsrohr geschilderte, vervielfältigte Wirkung in Gang kommt. In dieser Weise kann eine Spitze zu höchst empfindlichem Nachweis von Trägerquellen dienen. Dringt z. B. auch nur ein einziges schnellbewegtes Elektron (β-Strahl, 551) oder ein schnelles He-Atom (α-Strahl, 550) ins Gehäuse, die beide trägererzeugend wirken (durch Sekundärstrahlung, bzw. Nähewirkung), so wird ihr Eintritt durch Entladung der Spitze angezeigt, und man kann in dieser Weise einzelne Elektronen oder Atome zählen, wenn sie nicht zu dicht aufeinander folgen („Spitzenzähler", „Zählrohr").

Die Elektrizitätsleitung im elektrischen Bogen (219) ist, ähnlich der in Flammen (510), durch die, hier vom Strom selbst unterhaltene, hohe Temperatur bedingt. Hauptelektronenquelle ist beim Kohlebogen die heiße negative Kohle durch glühelektrische Wirkung (476); beim Bogen zwischen Metallen sind es wohl die Atome der stets sich entwickelnden Metalldämpfe, wie in den metallhaltigen Flammen, durch Nähewirkung (511). Wegen des Elektronenverlustes sind verdampfte Kohlenstoffatome wie Metallatome im Bogen wohl größtenteils positiv ge-

laden, weshalb diese Atome von der positiven Kohle zur negativen wandern. Metall, das im Bogen sich verbreiten soll, muß demnach auf die positive Kohle gebracht werden, und diese Kohle selbst wird auch stärker verdampft als die negative; sie höhlt sich dadurch kraterförmig aus.

514. Zusammenfassendes über Bildungsweise und Beschaffenheit der Träger. — Als Bildungsweisen der Elektrizitätsträger haben wir in den verschiedenen betrachteten Fällen leitfähiger Gase (503—513) drei Vorgänge gefunden: Sekundärstrahlung, Resonanz, Nähewirkung. Alle drei sind Elektronenbefreiungsvorgänge (493, 471, 511), keineswegs etwa elektrolytischer Molekülzerfall (506, 510). Die echte Absorption eines irgendwie befreiten Elektrons an einem Molekül gibt einen negativen Träger; das Molekül, aus welchem das Elektron stammt, ist positiver Träger. Meist, jedenfalls in gewöhnlichen (sauerstoffhaltigen) Gasen (vgl. 512) bei gewöhnlichem Druck und gewöhnlicher Temperatur, lagern die so gebildeten Träger sofort einige elektrisch neutrale Gasmoleküle an, und als solche, mit je einem elektrischen Elementarquant Überschuß versehene Atomgruppen können die Träger lange im Gas bestehen bleiben. Sie haben die schon angegebenen Größen (508).

Andere Trägerbildungsweisen, ohne Vermittelung freier Elektronen, kommen bei Zerstäubungen fester oder flüssiger Körper vor, deren Oberflächen im allgemeinen eine elektrische Doppelschicht tragen (134). So bei der Wasserfallelektrizität, deren Träger kleinste, aus der Flüssigkeitsoberfläche herausgerissene Tröpfchen sind. Reines Wasser liefert überwiegend negative Träger, entsprechend der negativen Ladung der äußersten Molekülschicht; Salzlösungen geben auch viele, bei einiger Konzentration sogar überwiegend, positive Träger. Die Größen dieser Träger sind ganz uneinheitlich, wie es bei der Entstehungsweise auch nicht anders zu erwarten ist. Es kommen von kleinsten, nur aus wenig Molekülen bestehenden Trägern an (Radius $0{\cdot}5 \cdot 10^{-6}$ mm) alle Größen bis zum etwa 10fachen Radius bei negativen, 20fachen bei positiven Trägern vor; außerdem können beliebig große Träger durch Anlagerung der ursprünglich gebildeten an neutrale, in der Luft schwebende Flüssigkeitströpfchen entstehen.

Solche ganz große Träger kommen auch bei jeder anderen Entstehungsweise in freier Luft stets vor; sie sind Nebelkerne (s. W 229 u. f.), Staubpartikel, die fast nie in der freien Luft fehlen und an welche ursprünglich kleine Träger sich angelagert haben. Schwebende feste Partikel entstehen sogar oft gleichzeitig mit Trägern in der Luft, z. B. bei Wirkung von Kathodenstrahlen oder von ultraviolettem Licht, die beide Ozon geben (442, O 100), welches mit fast nie fehlenden Ammoniakspuren zu salpetrigsaurem und salpetersaurem Ammon oder auch mit anderen Dämpfen zu ebenfalls festen Produkten reagiert.

Die allerkleinsten Träger in Luft von 1 Atm. und Zimmertemperatur erhält man, wenn alle Dämpfe, besonders auch Wasserdampf ferngehalten sind; einzelne Moleküle sind aber auch diese Träger nicht; sie sind nur wenig kleiner als oben für die kleinen Träger im allgemeinen angegeben (508).

Alle diese Träger haben nur 1 Elementarquant Ladung, was auch bei ihrer Größenberechnung angenommen wird; mit mehr als einem Elementarquant versehene Träger — kurz „mehrfach geladene Träger" — können vorkommen; sie sind aber selten. Die mikroskopische Beobachtung schwebender Tröpfchen, an welche Träger aus der Umgebung sich anlagern können, zeigte dies. Das Tröpfchen befindet sich in vertikalem elektrischen Felde (vgl. 195) und wandert meßbar aufwärts oder abwärts; die Anlagerung eines Trägers bemerkt man an plötzlicher Veränderung der Geschwindigkeit dieser Wanderung, und aus der Größe der Veränderung ist die Ladung berechenbar, welche der Träger mitbrachte, wobei auch wieder eine Kontrolle der Größe des Elementarquants erhalten wird. Die Seltenheit der mehrfachen Ladungen, außer bei sehr großen Trägern, ist erklärlich; denn jeder bereits mit einem Elementarquant versehene Träger stößt gleichnamige Ladung ab, nimmt also nicht leicht noch mehr Ladung auf.

515. Jonen und Träger. — In allen Fällen von Elektrizitätsleitung in Gasen sahen wir einen der Elektrizitätsleitung in den Elektrolyten insofern ähnlichen Vorgang, als es hier wie dort auf Wanderung beweglicher Elektrizitäten ankommt. Dieses Gemeinsame ist aber gar nichts Besonderes; denn Elektrizitätsleitung ist überhaupt und immer Bewegung von Elektrizität. Das Besondere ist in jedem einzelnen Falle die Beschaffenheit der mit der Elektrizität wandernden

Materie, und dieses Besondere muß zur Förderung klarer Kenntnis von den Vorgängen auch in der Namengebung hervorgehoben werden; Namen, die allzuviel Verschiedenes bedeuten, können dem treffenden Ausdruck kenntnisreicher Gedanken nicht dienen.

Bei den Elektrolyten nannten wir die mit elektrischem Überschuß wandernden Teile „Jonen", und der besondere Name ist durch die allgemeingültigen Besonderheiten dieser wandernden Teile gerechtfertigt und hat dadurch einen besonderen Sinn. Die Jonen sind stets Atome oder Atomgruppen, die durch Spaltung von Molekülen entstanden sind, und die dabei mit Ladungen auseinandergetrennt sind, deren Zeichen und Größe durch das chemische Verhalten dieser Molekülteile fest bestimmt ist.

Ganz anders bei den wandernden Elektrizitäten in den Gasen. Hier steht weder Zeichen noch Größe der Ladung in einfacher Beziehung zur materiellen Beschaffenheit der Träger; es können hier — um nur ein Beispiel zu nennen — Metallatome sogar als negative Träger auftreten (510). Es können auch freie Elektronen an Stelle von Trägern auftreten (510, 512), so daß die Elektrizitätsleitung ohne wesentliche Mitwirkung wandernder Materie stattfindet. Dieses Fehlen eines festen Zusammenhangs der bei der Leitung bewegten Elektrizität mit tragender Materie tritt auffallend schon dadurch zutage, daß es Elektrolyse in Gasen — Abscheidungen bestimmter Stoffe in bestimmten Mengen — nicht gibt. Vergeblich hat man sie gesucht; nur unreine Versuche haben sie zeitweilig vorgetäuscht. Auch die Entstehungsweise der Elektrizitätsträger in den Gasen (506, 510, 514) ist eine ganz andere als die der Jonen in den Elektrolyten (184, 198, 199).

Alles dies rechtfertigt es nicht nur, sondern macht es beim Bedürfnis klarer Begriffsbildung und entsprechender Ausdrucksweise durchaus erforderlich, für die Fälle von Elektrizitätsleitung in Gasen den Namen „Jonen" nicht zu gebrauchen, sondern es bei dem, der großen Verschiedenheit der vorkommenden Fälle gut angepaßten Namen „Träger" zu belassen, wo nicht überhaupt freie Elektronen in Betracht kommen[1]).

516. Sichtbarmachung von Trägern durch Dampfkondensation (Nebelmethode). — Da die Träger gewöhnlich Molekülgruppen (komplexe Moleküle) sind (514), wirken sie bei der Dampfkondensation als Nebelkerne (W 229 u. f.). Dadurch werden sie in genügend dampfübersättigtem Gase zu Tröpfchen, die bei günstiger Beleuchtung sogar einzeln gut sichtbar sind. In dieser Weise kann man Elektrizitätsträger unmittelbar sichtbar und bei nicht zu großer Dichte auch zählbar machen.

Dies ist auch zur Untersuchung von Einzelheiten im Verhalten schneller Elektronen in Gasen wichtig geworden. Man kann so den Weg eines einzelnen schnellen Elektrons im Gasraum sichtbar machen, da er von den vielen durch Sekundärstrahlung gebildeten Trägern (vgl. 505) erfüllt ist, die dann alle zu Tröpfchen werden. Man sieht so die Geradlinigkeit bei großen, die Krummlinigkeit bei kleineren Geschwindigkeiten. Bei schnellsten Elektronen ist auch das Auftreten schneller Sekundärelektronen (493) unmittelbar sichtbar, da diese ihren Weg durch Tertiärstrahlung ebenfalls mit Trägern erfüllen.

Auch die durch Hochfrequenzstrahlen im Gase lichtelektrisch befreiten mittelschnellen Elektronen sind mit ihren Bahnen durch die vielen Träger, die sie erzeugen, sichtbar zu machen. Der Weg eines schmalen Bündels von Hochfrequenzstrahlen erscheint dabei in breiter Umgebung umsäumt von den Bahnen der freigemachten Elektronen. Man sieht so unmittelbar die schon erläuterte Entstehungsweise der Luftleitfähigkeit durch Hochfrequenzstrahlen (507).

[1]) Der unterschiedslose Gebrauch des Namens „Jonen" entspricht einer vergangenen, noch wenig fortgeschrittenen Kenntnisstufe. Das Fortbestehen des Gebrauchs kommt allerdings der Bequemlichkeit entgegen; es ist weder Kenntnis noch Gedankenbemühung notwendig, um fast alles Beliebige „Jon" zu nennen. Oberflächlichkeit rächt sich aber auch; man kennt Fälle von Fehlschlüssen durch Anwendung quantitativer Daten, die zu wirklichen elektrolytischen Jonen gehören, auf davon verschiedene, sogenannte „Jonen".

Auch die Wege der radioaktiven α-Partikel (538, 550), die in Gasen durch Nähewirkung auch viel Träger erzeugen, konnten so sichtbar gemacht werden, ebenso wie die Wege von ihnen getroffener Atome, was wichtige Auskünfte geliefert hat (vgl. 539 u. f., 572 u. f.).

Aussichtsreich ist die fortgesetzte Anwendung der Nebelmethode auch zur Erkennung und Untersuchung schnellbewegter Teile noch unbekannter Art, die — aus verschiedenen Ursachen — aus Atomen austreten, was samt den Bahnen und sonstigem Verhalten dieser Teile sichtbar gemacht werden kann, weil sie trägerbildend wirken (vgl. 533, 572 u. f.).

517. *Natur der Kanalstrahlen; positive Strahlen.* — Wir haben schon die Entstehungsweise der Kanalstrahlen angegeben (513), wonach sie Bündel hinter die Kathode einer Entladungsröhre geschleuderter, positiv geladener Gasmoleküle oder Atome wären.

Die Richtigkeit hiervon war durch besondere Versuche an diesen Strahlen zu erweisen, analog den Versuchen, die zur Ergründung der Natur der Kathodenstrahlen geführt hatten (452 u. f.).

Es zeigte sich in der Tat, daß die Kanalstrahlen magnetisch und elektrisch ablenkbar sind, wie Kathodenstrahlen, nur in entgegengesetzter Richtung, ganz wie es für bewegte, positiv geladene Massen zu erwarten war, und es kam darauf an, diese Ablenkungen messend zu verfolgen. Um reine Versuche mit den Strahlen ausführen zu können, läßt man sie ins Vakuum treten, indem man die Öffnung in der Kathode (o in Abb. 118) als sehr enges, kurzes Rohr ausbildet, das — als Ersatz eines für diese Strahlen im allgemeinen nicht möglichen luftdichten Fensters — den Erzeugungsraum vom Beobachtungsraum trennt. Der Beobachtungsraum wird dauernd leergepumpt; im Erzeugungsraum muß der für die Entladung erforderliche Gasdruck aufrecht erhalten werden. Deshalb wird dort dauernd so viel Gas zuströmen gelassen als durch das Rohr in den Beobachtungsraum entweicht. Hält die Pumpe letzteren Raum möglichst leer, so werden die Versuche entsprechend rein. Die Strahlen sind dann mit mattem Leuchten auf ihrem ganzen Verlauf zu sehen; ihre Auftreffstellen bilden sich wie die von Lichtstrahlen oder Kathodenstrahlen an einem Phosphoreszenzschirm oder photographisch ab. Die Messungen der elektrischen und der magnetischen Ablenkungen im Beobachtungsraum, berechnet in der für die Kathodenstrahlen schon erläuterten Weise (454), ergeben das Verhältnis von Ladung zu Masse, e/m, und die Geschwindigkeit v für die in diesen Strahlen vermuteten, bewegten Teile. Das Verhältnis e/m zeigte sich abhängig von der Natur des Gases im Erzeugungsraum, und es entspricht der Masse m der dort vorhandenen Moleküle oder Atome mit einer Ladung e von 1 oder auch 2 (selten mehr) Elementarquanten positiver Elektrizität. Die etwas uneinheitliche Geschwindigkeit v hängt von der Stärke des elektrischen Feldes vor der Kathode ab und ist gleich der Endgeschwindigkeit, welche die Massen m in diesem Felde annehmen können. Dies alles entspricht vollkommen der vermuteten Natur und Entstehungsweise der Kanalstrahlen (513) und bestätigt dabei außerdem die auch durch viel anderes angezeigte Entstehungsweise der Kathodenstrahlen durch Nähewirkung an der Kathodenoberfläche (461). Dazu gehört auch die Uneinheitlichkeit der Geschwindigkeit v bei den Kanal-

ſtrahlen, welche den verſchiedenen Strecken entſpricht, die von den aus verſchiedenen Teilen des Gasraumes vor der Kathode ſtammenden Maſſen m im elektriſchen Felde der Kathode durchlaufen werden. Auch ſonſt iſt es vollkommen bewährt und in beſter Übereinſtimmung mit aller Kenntnis, daß die Kanalſtrahlen geſchleuderte, poſitiv geladene materielle Maſſen, Atome oder Atomgruppen ſind, wonach man ſie auch „poſitive Strahlen" nennt.

Dieſe Strahlen ſind daher nichts ſo Einheitliches wie die Kathodenſtrahlen, die immer Elektronen ſind, ſondern es gibt ſo vielerlei poſitive Strahlen als es Atome und Atomgruppen gibt. Auch die α-Strahlen der radioaktiven Stoffe (550) gehören zu den poſitiven Strahlen, da ſie geſchleuderte poſitive Helium-Atome ſind; ſie bedürfen keiner Erzeugung, ſondern werden von den Stoffen, z. B. Radium, von ſelber ausgeſandt (547 u. f.).

Die Uneinheitlichkeit der Geſchwindigkeit der Atome in einem Kanalſtrahl hat viel Zuſammenſtöße der Atome des Strahls untereinander zur Folge, und dies macht die Vorgänge in einem ſolchen Strahl bei einiger Intenſität ſelbſt im Vakuum ſehr verwickelt. Es kommt bei den Zuſammenſtößen zu Freiwerden von Elektronen durch Nähewirkung und zu vielerlei Zuſtandswechſeln der Atome während ihrer Bewegung im Strahl, weitgehend ähnlich den Zuſtandswechſeln in Flammen (510); auch das Leuchten der Kanalſtrahlatome auf ihrer Bahn wird, wie bei den Flammen, durch Zuſammenſtöße erregt.

518. Maſſenſpektroſkopie; Iſotope. — Das Studium der poſitiven Strahlen hat zu einer weſentlichen Erweiterung der Kenntnis von den Atomgewichten geführt. Man konnte zunächſt eine Kontrolle der abſoluten Gewichte der Atome verſuchen, da die Strahlen in den Ablenkungsverſuchen (517) das Verhältnis von Ladung zu Maſſe ihrer Atome geben und die durch das elektriſche Elementarquant gegebene Ladung in abſolutem Maße ſchon genügend bekannt war (195). Durch elektriſche und magnetiſche Ablenkungen gelingt es mit Anwendung mehrerer Kunſtgriffe, die Strahlen unter Ausſchaltung von Geſchwindigkeitsverſchiedenheiten ſo zu lenken, daß jedem Punkt des Auffangſchirmes ein anderer, beſtimmter Wert von e/m entſpricht. Man hat dadurch am Schirm oder auf der photographiſchen Platte ſogleich die Angabe für alle Werte von e/m, die einer gegebenen Gasfüllung des Erzeugungsrohres zugehören, und da für e nur kleine ganze Zahlen von Elementarquanten in Betracht kommen, hat man auch Angaben für die Atommaſſen m. Man kann daher das Bild am Schirm ein „Maſſenſpektrum" nennen, das faſt unmittelbar Atommaſſen und alſo auch Atomgewichte ableſen läßt.

In dieſer Weiſe zeigte ſich, was das Studium der radioaktiven Elemente ſchon für dieſe angezeigt hatte (571), daß Ungleichheiten zwiſchen den Atomen eines und desſelben Elementes vorkommen derart, daß die bis dahin ermittelten Atomgewichte als Mittelwerte erſcheinen aus ſtufenweiſe ein wenig verſchiedenen Einzelwerten, die das Maſſenſpektrum zeigt. Die bekannten Methoden der Atomgewichtsbeſtimmung (M 23, W 125) konnten in der Tat nur Mittelwerte der Gewichte ſehr vieler Atome ergeben und Ungleichheiten nicht zeigen, weil ſie nur an ſehr großen Anzahlen von Atomen durchführbar ſind; das Maſſenſpektrum erfordert dagegen nicht nur ſehr geringe Stoffmengen, ſondern es trennt ungleiche Atomgewichte von ſelber.

Es zeigt sich, daß so gut wie bei allen Elementen Ungleichheiten der Atome bestehen[1]). Dabei ist bemerkenswert, daß die Einzel-Atomgewichte alle viel näher ganzen Zahlen sind als die vorher bekannten Mittelwerts-Atomgewichte. Zum Beispiel zeigt Chlor die Atomgewichte 35 und 37 (mit größerer Häufigkeit für 35) statt 35·5[2]); Quecksilber zeigt 6-erlei Atomgewichte von 198 bis 204 (spurenweise auch noch andere) statt 200·6.

Chemische Methoden trennen diese Atome ungleichen Gewichts nicht; sie haben, soweit bekannt, ganz oder nahe vollkommen gleiche chemische Eigenschaften und nur geringe Unterschiede in ihren Spektren; sie bleiben daher mit Recht durch den gleichen Element-Namen bezeichnet und mit der gleichen Ordnungszahl (M 23) versehen. Man nennt solche Atome gleichen chemischen Verhaltens aber etwas verschiedenen Gewichts „Isotope"[3]). Chlor hat demnach, soweit schon gut bekannt, 2 Isotope; dementsprechend gibt es auch zweierlei Salzsäure von gleichem chemischen Verhalten, aber verschiedenem Molekulargewicht (nämlich 36 bzw. 38)[4]). Das auf Erden vorkommende Chlor ist, wie das Atomgewicht 35·5 anzeigt, Gemisch ungleicher Mengen der beiden Isotopen der Gewichte 35 und 37. Durch Diffusion sind Isotope in Gasgestalt trennbar, entsprechend der Massenverschiedenheit ihrer Moleküle (M 367, W 108). Auch die Zentrifuge (M 202), sowie Dampfdruckunterschiede und Löslichkeitsunterschiede können zur Anreicherung von Isotopen und deren Verbindungen dienen.

Zur Hervorbringung der Massenspektren kann in der Erzeugungsröhre der positiven Strahlen eine beliebige gasförmige Verbindung des betreffenden Elementes gebracht werden; man kann auch feste Verbindungen an die Anode bringen und dort verdampfen lassen („Anodenstrahlen"). Daß doch in jedem Falle die freien Atome im Massenspektrum erscheinen, beweist, daß Moleküle in der Entladungsröhre zur Zersetzung kommen, wohl indem ihnen das zusammenhaltende Valenzelektron (182) durch Sekundärstrahlung oder Nähewirkung entzogen wird (vgl. 542).

Sehr bemerkenswert ist es, daß auch das Wasserstoffatom ein Isotop hat und zwar, wie hier im einfachsten Falle zu erwarten, mit dem um eine Einheit erhöhten, also verdoppelten Atomgewicht 2. Dieser „schwere Wasserstoff", auch „Deuterium" genannt, kommt nur in sehr geringen Mengen vor und zwar im gewöhnlichen Wasser, dessen Wasserstoff zu etwa 1/6000 Isotop ist. Es ist gelungen, das „schwere Wasser" mit dem isotopen Wasserstoff in seinen Molekülen in ziemlicher Reinheit darzustellen; es bleibt in elektrolytischen Zellen nach lange fortgesetzter Wasserzersetzung als Rest übrig[5]). Sein spezifisches Ge-

[1]) Bei den Elementen mit ungerader Ordnungszahl sind weniger Isotope gefunden als bei denen mit gerader Ordnungszahl.

[2]) Es ist mit O = 16·000 H = 1·008; die beiden Cl sind 34·980 und 36·978; das gewöhnliche, gemischte Cl ist 35·457.

[3]) Die radioaktiven Isotopen s. unter 571, künstlich herstellbare Isotope unter 573 u. 575.

[4]) Im Molekülspektrum von HCl kommen Linienverdoppelungen vor, welche den etwas verschiedenen Eigenschwingungsdauern entsprechen, die bei den verschiedenmassigen Cl-Atomen in der Molekülbindung zu erwarten sind.

[5]) Bei H_2SO_4 als Elektrolyt kann angenommen werden, daß schwere H-Jonen infolge erhöhter Wasseranlagerung (198) langsamer wandern. Bei NaHO als Elektrolyt scheint die sekundäre Reaktion (vgl. 177) $Na + H_2O = NaHO + H$ mit schwerem Wasserstoff langsamer abzulaufen.

wicht, Siedepunkt, Schmelzpunkt und Dichtemaximum sind etwas höher als beim gewöhnlichen Wasser. Eine Besorgnis, daß die Zuverlässigkeit der Gewichtseinheit, der Wärmeeinheit, der Temperaturskale, die alle auf das Wasser gegründet sind, in Frage gestellt sein könnte, erscheint nicht gerechtfertigt, da das Wasser der Erde ständiger Durchmischung unterliegt, also bei nicht besonderer Behandlung stets von einheitlicher Beschaffenheit zu erwarten ist.

519. Doppler-Effekt bei Kanalstrahlen. — Noch eine wichtige Beobachtung an Kanalstrahlen ist zu bemerken. Es befinden sich in diesen Strahlen lichtaussendende Atome in Bewegung mit großen Geschwindigkeiten, die sonst irdische Lichtquellen nicht haben. Dies gibt Gelegenheit, die Gültigkeit von Dopplers Prinzip für Lichtwellen (A 92) zu prüfen. Es zeigte sich, daß die nach dem Prinzip zu erwartenden Wellenlängenänderungen vorhanden sind in einer der Geschwindigkeit der Strahlen entsprechenden Größe. Man läßt dazu das Licht der Kanalstrahlen in Strahlrichtung in ein Spektroskop treten und mißt die Verschiebung der Spektrallinien im Vergleiche zu ihrer Lage bei Beobachtung senkrecht zum Strahl. Die Ausbreitung der Lichtwellen von bewegter Quelle verläuft also im Äther ebenso wie die von Schallwellen in der Luft. Jeder Teil der Welle läuft unabhängig von der Bewegung der Quelle mit der stets relativ zum Äther des Ortes geltenden Geschwindigkeit (vgl. O 23, 25, 26).

519 a. Axialität der Lichtemission. — Wichtig für ein noch anzubahnendes Verständnis der Vorgänge bei der Lichtemission von Atomen sind zwei Beobachtungen an Kanalstrahlen, nämlich die Polarisation ihres Lichtes und eine Intensitätsverschiedenheit des nach vorn, in Bewegungsrichtung des Strahles, und des nach rückwärts ausgesandten Lichtes. Die Polarisation ist nur teilweise (O 171); es kann die Amplitude in Richtung des Kanalstrahles oder auch senkrecht dazu überwiegen, je nach Art der Kanalstrahlatome und der Atome des umgebenden Gases. Auch die Intensitätsverschiedenheit nach vorn und nach rückwärts hängt von diesen Umständen ab.

Als wesentlich für das Auftreten dieser Axialitäten erscheint die gleichgerichtete Bewegung der emittierenden Atome im Kanalstrahl, während in allen anderen Lichtquellen die Bewegung ungeordnet ist.

Die Atome.

520. Die im Vorhergehenden behandelten Strahlungen haben zum erstenmal gangbare Wege ins Atominnere gezeigt, was den Anfang zur neueren Kenntnis von den Atomen gegeben hat (1894—1903). Aus der Diffusion der Kathodenstrahlen in der Materie war auf elektromagnetische Felder in den Atomen zu schließen (445); sekundäre Kathodenstrahlung (493) und lichtelektrische Wirkung (466) wiesen bewegliche, abtrennbare Elektronen als Bestandteile der Atome nach; die Absorption der Kathodenstrahlen zeigte den Aufbau aller Atome aus einheitlichen Bestandteilen (451) mit sehr viel durchdringlichen Zwischenräumen (491). Mit dem ebenfalls aus dem Studium der Kathodenstrahlen erfolgten Nachweis des Bestehens der Elektronen und der Kenntnis ihrer Eigenschaften (458) war so der Aufbau der Atome aus den beiden Elektrizitäten als gesicherter Anhaltspunkt für alles weitere Vordringen gegeben (529).

Es ist daher hier der Ort, die schon einigermaßen auf Tatsachen gegründete Kenntnis von den Atomen kurz zusammenzufassen. Wir beginnen dabei mit den wohlgesicherten Grundkenntnissen, um dann allmählich zu weniger Gesichertem

überzugehen und zuletzt einige Ergebnisse zu nennen, deren Deutung noch viel weitere Arbeit erforderlich erscheinen läßt. Wenn wir dabei lieber zu viel als zu wenig für noch ungeklärt erachten und manche vielversprechende Anfänge unerwähnt lassen, so können dafür die gesicherten Ergebnisse und bleibend wertvollen Einsichten um so besser hervortreten. Letzteres zu erreichen, ist — im Sinne der „Deutschen Physik" — auch der besondere Zweck der folgenden Zusammenstellung. Weitere Forschung müßte sie zur vorgegebenen Grundlage nehmen.

521. Nachdem aus den Untersuchungen der Chemiker das Bestehen der vorgegebenen kleinen Teile der Materie, die wir Atome nennen, klar geworden war (M 20—22), wurden die Relativgewichte dieser Atome mit zunehmender Sicherheit und Genauigkeit festgestellt (M 23, W 125). Verfeinerungen in der Kenntnis der Atomgewichte, die aber den früheren Feststellungen nicht widersprechen, sind spät hinzugekommen (518). Es haben sich auch an den Körpern des Himmelsraumes überall dieselben Atome gezeigt (O 91). Auch die absoluten Gewichte der Atome wurden feststellbar (W 102) und haben allen Nachprüfungen standgehalten (195, 518).

Eine umfassende Zusammenstellung aller Atomsorten bietet das „natürliche System der Elemente" (Atomtabelle, M 23, Bd. I und E 568 mit Abb. 122 in diesem Bande). Es hat in demselben jedes Atom, bekannter oder noch aufzufindender Art, einen durch Gewicht und chemisches Verhalten fest bestimmten Platz. Atome von einerlei chemischem Verhalten, wenn auch etwas verschiedenem Gewicht (518), gelten als einerlei „Element", und jedes Element hat in diesem System seine bestimmte, von 1 (bei H) bis 92 (bei Ur) laufende Ordnungszahl (M 23).

522. Die gegenseitige Undurchdringlichkeit, welche die Atome und ihre Gruppen, die Moleküle, gegen Druck und bei der Wärmebewegung zeigen (M 16, 27, 267, 305, W 90 u. f.), führte zur Ermittelung ihrer Durchmesser, d. i. der Durchmesser von Kugeln, welche das für ihresgleichen undurchdringliche Volum der Atome und Moleküle angeben. Diese Durchmesser — auch gaskinetische Durchmesser genannt — liegen bei den verschiedenen Atomen etwa zwischen den Grenzen 2 bis $6 \cdot 10^{-8}$ cm. Sie zeigten sich dabei je nach Umständen — Höhe des Druckes, Geschwindigkeit der Annäherung bei den Zusammenstößen und Aggregatzustand — etwas verschieden (W 98, 106), als wären die Atome verwaschen begrenzt oder in ihrem Volum etwas veränderlich, was mit deren losem Bau (520) stimmt.

523. An der Wärmebewegung nehmen die Atome nur mit ihrem Schwerpunkt teil und zwar auch wenn sie zu Molekülen verbunden sind. Eine Beteiligung des Atominneren an der Wärmebewegung ist trotz beweglicher Teile (520) nicht merklich geworden (W 121, 115); doch nehmen die Atome je nach der Temperatur verschiedene Zustände an, wie es ihre Lichtemission zeigt (O 82).

524. Daß das Atom außerhalb seines Durchmessers nicht zu Ende ist, dies zeigt vor allem seine bis in größte Entfernungen wirkende Gravitation (M 210, 214). Auch hat jedes Atom eine ihm zugehörige Ätherhülle gezeigt (O 23, E 405), die wohl Bewirker der Gravitation ist (585).

525. Außerdem sind in der nächsten Umgebung der Atome deren *Molekularkräfte* und *chemische Kräfte* merklich, erstere Moleküle, letztere die Atome im Molekül zusammenhaltend (M 246). Die *chemischen Kräfte* haben sich durch die Erscheinungen der Elektrolyse deutlich als *elektrische Kräfte* gezeigt (181). Die Eigenschaften der *Molekularkräfte* — Anziehung, Abstoßung, Drehung (M 248 u. f.) — sind ähnlich denen elektrischer und magnetischer Kräfte, und die Oberflächenbeschaffenheit der Flüssigkeiten liefert den besonderen Nachweis dafür, daß die Molekularkräfte ebenfalls elektrischer Natur sind (135). Die Absorption langsamster Kathodenstrahlen hat unmittelbar gezeigt, daß die Atome *elektromagnetische Felder in ihrer Umgebung* haben, da die absorbierenden Querschnitte größer gefunden wurden als die gaskinetischen Querschnitte (491). Die Gesamtwirkung der Molekularkräfte ist eingehend in der Form der *elastischen Eigenschaften* der festen und flüssigen Körper und der *Oberflächenspannung* der letzteren studiert (M 253 u. f., 312 u. f., 315 u. f.).

526. Die Atome verhalten sich wie *elektrische Oszillatoren und Resonatoren* (430, O 113); sie wirken Wellen erzeugend und absorbierend (O 71, 88, 90, 91). Die Spektren geben Anzeige über die, äußeren Einflüssen gegenüber mehr oder weniger geschützte Lage der Wellenausgabe- und Aufnahmestellen im Atominneren (O 81, 86, 105, E 502). Über die von den Atomen ausgesandten Wellenlängen, d. i. über Eigenschwingungsdauern der Atome ist reiche Erfahrung vorhanden und teils in Serienformeln geordnet (O 83). Über die Vorgänge bei der Lichtemission und Absorption ist aber noch nichts Gesichertes ermittelt, obgleich mancherlei Kenntnisse (527, 528, 519a, O 165, W 182) und Rechnungen (544) zur Verfügung stehen. Es fehlt Kenntnis der Kraftfelder des Atominneren (546).

527. Eine besonders charakteristische Eigentümlichkeit des Atominneren ist das *quantenmäßige Arbeiten* (W 180).

528. Die zu einer Lichtaussendung nötige Energiezufuhr zum Atom — die *Leuchterregung* — kann zeitlich weit getrennt sein von der *Lichtaussendung*. Die Leuchterregung besteht in einer irgendwie gearteten Verschiebung eines Elektrons im Atom, und die Lichtaussendung ist mit der Rückkehr des Elektrons verbunden (O 115).

529. Mit den nachgewiesenen Elektronen (520) muß in den elektrisch neutralen Atomen auch positive Elektrizität in gleicher Menge vorhanden sein. Alle Gewinnungsweisen freier Elektrizitäten zeigen, mit dieser Einsicht verfolgt, daß *Elektrizitäten überhaupt nur aus Atomen kommen* (vgl. die Zusammenstellung in 10), und altbekannte Vorgänge — Influenz, dielektrisches Verhalten, elektrische Stromleitung, Eigenschaften der Elektrolyte und vieles andere — wurden damit einwandfrei verständlich (16 u. f., 113, 138, 182, 201, 503 u. f.).

530. Das Studium der *Radioaktivität* (547 u. f.) zeigte selbsttätige Abgabe von Elektronen großer Geschwindigkeit aus Atomen und zeigte auch den *Zerfall von Atomen* (555), der mit der Zusammengesetztheit aller Atome aus einerlei Grundbestandteilen (520) in Übereinstimmung ist.

531. Dynamiden. — Was von einheitlichen Bestandteilen aller Atome bemerkbar wurde, sind nach dem Vorhergehenden nur die elektromagnetischen Felder (520) und die ebenfalls nachgewiesenen Zentren solcher Felder, die beiden Elektrizitäten (529). Daß auch die positive Elektrizität — wie die negative — in Elementarquanten von einheitlicher Ladungsgröße abgeteilt in den Atomen vorhanden ist, dies zeigten die Erscheinungen der Elektrolyse (193). Als einfachster Grundbestandteil aller Atome in ihrem elektrisch neutralen Zustand erscheint demnach ein positives und ein negatives Elementarquant der Elektrizität mit dem zu ihnen gehörigen, sie zusammenhaltenden elektrischen Felde. Man kann eine solche Gruppe „Dynamide" nennen. Alle Atome erscheinen demnach aus Dynamiden zusammengesetzt und zwar, der massenproportionalen Wirkung nach (451), in einer dem Atomgewicht proportionalen Zahl.

Der Wert des Begriffes „Dynamide" liegt darin, daß in ihm nur unmittelbar durch Erfahrung Festgestelltes festgehalten wird, während unbekannte Einzelheiten — wie Beschaffenheit des Kraftfeldes, Anordnung oder Bewegung der Ladungen — ganz offen gelassen sind.

532. Hierzu ist die einfachste mögliche Annahme, daß das leichteste Atom, das Wasserstoffatom, nur eine Dynamide enthält, und sonst nichts. Es ist dann die Zahl der Dynamiden in jedem Atom gegeben durch das Atomgewicht. Dies ist in Übereinstimmung mit der sehr nahen Ganzzahligkeit der Atomgewichte der nicht gemischten Elemente, nämlich der einzelnen Isotopen (518). Die kleinen Abweichungen von den ganzen Zahlen können den auch aus anderen Gründen anzunehmenden Verschiedenheiten der Dynamiden der verschiedenen Atome (542) zugeschrieben werden, nämlich Verschiedenheiten in der Ausdehnung und damit auch im Energieinhalt des elektrischen Feldes der Dynamiden. Auch die Abweichungen von der Massenproportionalität der Kathodenstrahlabsorption (449) zeigen solche Verschiedenheiten an.

Damit die Massen und also auch Gewichte (437) der Dynamiden, die in schweren Atomen in entsprechend großer Zahl vorhanden sind, nahe ungestört zum Gesamtgewicht des Atoms sich addieren — wie es die nahe Ganzzahligkeit der Atomgewichte anzeigt — ist übrigens erforderlich, daß keine wesentliche Übereinanderlagerung der Kraftfelder der einzelnen Dynamiden stattfindet. Denn eine solche Übereinanderlagerung würde zwar in bezug auf die Kräfte ungestört sein können, nicht aber in bezug auf die Energien und also auch auf die Massen und Gewichte; die Energien sind nämlich nicht den Kräften, sondern deren Quadraten proportional (123, 365); die Vermehrung einer Feldstärke durch Zusammenschieben vorhandener Felder ist dementsprechend nicht ohne Energiezufuhr, also Massenvermehrung möglich. Die tatsächliche, nahe Ganzzahligkeit der Atomgewichte zeigt somit an, daß die räumliche Ausdehnung der starken Teile der Kraftfelder der Dynamiden so klein sein muß, daß selbst in Atomen, die hundert und mehr Dynamiden enthalten, keine merklichen Übereinanderlagerungen stattfinden. Solche Kleinheit ist aber auch mit der aus der Absorption schnellster Kathodenstrahlen folgenden Kleinheit des undurchdringlichen Dynamidenvolums (486, 491, 534) in Übereinstimmung.

533. Das Proton und das Positron. — Wenn, wie es die Ganzzahligkeit der Atomgewichte nach vorigem anzeigt, das Wasserstoffatom eine einzelne

Dynamide ist, bestehend aus einem Elektron und einem positiven Elementarquant mit dem sie verbindenden Kraftfeld, so ist die im Vergleich zum Elektron große Masse des Wasserstoffatoms auffallend. Die Masse des Wasserstoffatoms ist das 1800fache der Masse des Elektrons (458); somit muß das positive Elementarquant fast die ganze Masse des Wasserstoffatoms besitzen, also rund 1800fache Elektronenmasse; denn der Hauptteil der Masse des Kraftfeldes ist in den Massen der Elementarquanten schon einbegriffen zu denken (vgl. 485).

Es ist sehr auffallend, daß die beiden Elementarquanten, die gleiche Elektrizitätsmengen sind (193) und die an den beiden Enden der Kraftlinien eines und desselben Feldes sich finden, so verschiedene Massen zeigen. Es wäre möglich, daß das positive Elementarquant mit seiner großen Masse etwas Zusammengesetzteres ist als das Elektron; es könnte etwa eine dem Elektron gleiche Masse positiven Zeichens sein — welche dann das tatsächliche positive Elementarquant wäre —, verbunden mit einer 1800fachen elektrisch neutralen Masse. Für alle Fälle war es gut, dem positiven Teil der Dynamide mit seiner großen Masse bald einen besonderen Namen zu geben, statt es weiter „positives Elementarquant" zu nennen, und man hat dafür den Namen „Proton" gewählt.

Die einzelne Dynamide und so auch das Wasserstoffatom bestünde danach aus einem Proton und einem Elektron mit dem sie verbindenden Kraftfeld besonderer Art (s. 546). Das Wasserstoffion der Elektrolyse wäre das Proton, zusammengelagert mit 1 oder 2 Wassermolekülen (198). In Entladungsröhren mit Wasserstoff, wo die Moleküle unter Elektronenverlusten zerfallen (518), kommen demnach freie Elektronen und freie Protonen vor (vgl. 575). Die Atome der anderen Elemente enthalten so viele Protonen, mit gleich viel Elektronen und den sie zu Dynamiden verbindenden Kraftfeldern, als das Atomgewicht angibt. Es liegen hierzu in der Tat auch besondere Nachweise vor (573).

Das tatsächliche positive Elementarquant, eine dem Elektron ähnlich geringe Masse positiven Ladungszeichens, scheint auch schon gefunden zu sein; man hat es „Positron" genannt. Solche Positronen entweichen aus Materie unter dem Einfluß konzentriert energiereicher Strahlungen (Höhenstrahlen, 578, γ-Strahlen, 552, auch α-Strahlen, 550, 573); sie zeigen sich in der Nebelkammer (516) zwischen Magnetpolen durch Kreisbahnen, deren Krümmung entgegengesetzt der von Elektronenbahnen ist. Auch im elektrischen Felde zeigen sie eine dem Elektron entgegengesetzte Ablenkung. Aus der Verbindung der magnetischen mit der elektrischen Ablenkung (vgl. 454) ergibt sich das Verhältnis von Ladung zu Masse von gleicher Größenordnung wie bei den Elektronen. Ihre Absorption in der Materie ist nahe massenproportional, wie bei den Elektronen (448), und viel geringer als die von Protonen (vgl. 575); sie sind nicht haltbar, sondern verschwinden schnell in noch nicht aufgeklärter Weise.

Als am wenigsten bekannt erscheint bisher jene rund 1800fache, elektrisch neutrale Masse, welche im Proton jeder Dynamide mit dem Positron verbunden erscheint, — das Besondere der positiven Elektrizität ausmachend. Daß diese Masse etwa von anderer Art wäre als die Massen von Elektronen und Positronen, nämlich Energiemasse, ist bisher nicht festgestellt (s. 583).

534. Art der Raumerfüllung der Atome. — Nach der aus den Absorptionsmessungen schnellster Kathodenstrahlen erhaltenen Auskunft (491) ist der Raum der etwa undurchdringlichen Teile einer Dynamide, d. i. eines Elektrons und eines Protons zusammengenommen, nicht größer als der einer Kugel von $6 \cdot 10^{-12}$ cm Durchmesser. Dieser kleine Raum kann auch als obere Grenze des Eigenvolums einer Dynamide, d. i. des Volums ihrer stärksten Felder bezeichnet werden (vgl. 486, 534, 539).

Bei den bekannten Durchmessern der Atome (522) und den durch das Atomgewicht bekannten Dynamidenzahlen in ihnen (532) berechnet man leicht, daß in irgend einem festen Körper, der mit nur wenig Zwischenräumen von seinen Atomen ausgefüllt wird, weniger als nur 1 Tausendmilliontel seines Raumes den sehr starken Kraftfeldern seiner Dynamidenzentren eigen ist; aller andere Raum im Körper ist so leer als irgend ein außerhalb vorhandener Raum gewöhnlicher starker elektromagnetischer Kraftfelder. In 1 m^3 festen Platinmetalles bedeutet das beispielsweise nur höchstenfalls 1 mm^3 Eigenvolum der Dynamidenzentren.

535. Diese Art der Raumerfüllung im Atom zeigt unmittelbar die Möglichkeit des Einander-Durchdringens zweier Atome, wie sie bei der Molekülbildung vorkommt (M 24).

Vor allem müßte es bei so viel freiem Spielraum der Dynamidenzentren im Atom sehr verwunderlich erscheinen, wenn diese Zentren in Ruhe und nicht in ständiger Bewegung wären, da sie doch auch Enden der elektrischen Kraftlinien sind, die auf sie wirken. Man kann kreisende *Bewegungen von Elektron und Proton umeinander* annehmen, um durch zentrifugale Kräfte, oder — wenn man will — durch das Drängen der Kraftlinien des mit der Bewegung entstehenden Magnetfeldes, dem Zug der elektrischen Kraftlinien Gleichgewicht zu geben. Diese Annahme der Bewegtheit der Elektrizitäten in den Atomen ist weitgehend verfolgt; sie kommt schematisch in den Atombildern, Abb. 120, zum Ausdruck. Die Bewegung müßte, da nur innere Kräfte wirken, nach dem Schwerpunktssatz (M 217) um den gemeinsamen Schwerpunkt vor sich gehen. Sie müßte daher bei der ganz überwiegenden Masse des Protons (533) eine Bewegung des Elektrons in irgendwelchen geschlossenen Bahnen um das nahezu ruhende Proton sein. Der einfachste Fall ist die Kreisbahn; doch sind auch Rechnungen mit anderen Bahnen versucht worden (vgl. 544).

536. Kreisende Bewegungen der Elektronen wären Ursprung von Magnetfeldern, die mit den *magnetischen Eigenschaften* der Atome in Zusammenhang sich zeigen müßten. Vollkommen Befriedigendes ist hierin nicht erreicht, wobei allerdings die Schwierigkeit besteht, daß dem Elektron auch schon bei ruhendem Schwerpunkt magnetisches Verhalten zuzugehören scheint (304). Überhaupt kann nicht angenommen werden, daß Bewegungen der Elektronen im Atominneren dieselben Wirkungen haben, wie sie von sonstigen bewegten Ladungen bekannt sind; es müßte sonst die Elektronenbewegung in den Atomen durch Aussendung elektrischer Wellen sich erschöpfen.

537. *Auskunftserteilung durch die α-Strahlen.* — Ein vortreffliches Mittel zur fortgesetzten Erforschung des Atominneren haben die α-Strahlen der radioaktiven Körper (517 u. f.) gegeben. Sie sind schnell bewegte, doppelt positiv geladene Heliumatome mit großen Geschwindigkeiten (513). Die doppelte positive Ladung des Heliumatoms ist als Verlust zweier Elektronen desselben zu deuten; die Masse eines solchen „*α-Partikels*“ ist, nach dem Atomgewicht 4 des Heliums, gleich der von $4 \cdot 1800 = 7200$ Elektronen. Diese Körper verhältnismäßig großer Masse und wohl sehr kleinen Volums durchdringen, wie die Elektronen der Kathodenstrahlen, große Reihen von Atomen, ehe sie ihre Geschwindigkeit verlieren; sie sind daher *ebenfalls als Prüfkörper zur Erkundung des Atominneren* verwertbar (1911). Dabei gewähren sie den besonderen Vorteil, daß schon jedes einzelne α-Partikel nachweisbar und auf seinem Wege leicht verfolgbar wird, da es vermöge seiner großen Masse genug Energie

hat, um an geeignetem phosphoreszenzfähigem Schirm einen sichtbaren Lichtblitz zu geben. Außerdem können die Bahnen der α-Partikel auch mit der Nebelmethode sichtbar gemacht werden (516).

538. Kerne der Atome. — Es zeigt sich, daß diese Bahnen der α-Partikel fast geradlinig sind bis auf einzelne scharfe Knicke. Die nahe Geradlinigkeit, trotz Durchquerung der Atomfelder, stimmt überein mit der großen Masse und daher geringen Ablenkbarkeit der α-Partikel im Vergleiche zu den Elektronen. Die Knicke können als besondere, die α-Partikel reflektierende Stellen von großer Masse in den getroffenen Atomen gedeutet werden, und die Seltenheit der Knicke zeigt, daß diese Stellen räumlich eng begrenzt sein müssen. Sehr eingehende Untersuchungen der Richtungsänderungen der Bahnen der α-Partikel in festen und gasförmigen Stoffen verschiedenen Atomgewichts zeigte etwa das, was für die α-Partikel, nämlich doppelt positiv geladene kleine Körper von der Masse des Heliumatoms, zu erwarten wäre, wenn dieselben von räumlich eng begrenzten gleichnamigen Ladungen der Atome nach Coulombs Gesetz abgestoßen würden. Die Durchführung der Untersuchung zeigte nur ein einziges solches sehr kleines positives Ladungszentrum in jedem Atom, und die Größe der Ladung zeigte sich gleich der von so viel Protonen als die Ordnungszahl (521) des Atoms angibt. Man nennt die so angezeigten kleinen Ladungszentren der Atome „Kerne".

Es sind demnach sämtliche Protonen aller Dynamiden jedes Atoms in dessen Kern vereinigt zu denken, während die zugehörigen Elektronen den gesamten Atomraum zur Verfügung haben. Im Kern liegt wegen der großen Masse der Protonen auch der Schwerpunkt des Atoms.

539. Es ist sehr bemerkenswert, daß bei Berechnung der beobachteten Bahnen der α-Partikel Coulombs Gesetz widerspruchsfrei aufs unbekannte Atominnere anwendbar sich zeigte. Nur wenn äußerst kleine Abstände vom Kernmittelpunkt in Betracht kommen, war dies nicht der Fall[1]). Man kann diese nächste Umgebung des Kernmittelpunktes das Eigenvolum des kugelförmig angenommenen Kernes nennen. Danach ergibt sich der Durchmesser des Wasserstoffkerns, welcher ein einzelnes Proton ist (533), zu etwa $6 \cdot 10^{-13}$ cm. Dies widerspricht nicht dem durch die Kathodenstrahlen gelieferten 10-fach größeren Grenzwert, der für Proton und Elektron zusammengenommen gilt (534). Der Kern des Goldatoms hat trotz seiner, der hohen Ordnungszahl entsprechenden Zusammengesetztheit einen Durchmesser kleiner als $6 \cdot 10^{-12}$ cm gezeigt[2]). Die Raumeinnahme der Kerne ist daher stets fast verschwindend klein zu denken im Verhältnis zum ganzen Atomraum (vgl. 522), in dessen weit überwiegenden Teile auch durch die α-Strahlen nichts zu finden war als durchlässige Kraftfelder, wie es schon die schnellen Kathodenstrahlen zeigten (534).

540. Bei den schweren Atomen wie Au oder auch noch Cu, ist kein Zeichen dafür vorhanden, daß der das α-Partikel ablenkende Kern dabei sehr in Bewegung geriete. Es ist das auch nicht anders zu erwarten, wenn — wie sogleich

[1]) Vgl. auch das Eindringen von Protonen in Kerne (575), trotz der beiderseitigen gleichnamigen Ladungen, was nach Coulombs Gesetz nicht zu erwarten wäre.

[2]) Der Durchmesser müßte der Bedingung der Nichtübereinanderlagerung der stärksten Teile der Protonen- (und Elektronen-)felder im Kern (542) genügen (vgl. 532).

ſich beſtätigt — nahe die ganze Maſſe des Atoms im Kern enthalten iſt (538). Die leichten Atome, H, He, O zeigten ſich aber in der Tat zur Seite getrieben durch die α-Partikel, was durch die Nebelſpuren (516), die auch dieſe Atome bei ſo ſchneller Bewegung durch Nähewirkung erzeugen, gut verfolgbar war. Die Nebelſpur des α-Partikels erſcheint dann gegabelt, indem vom Stoßpunkte aus ſowohl das α-Partikel als auch das getroffene, abgeſtoßene Atom weitergeht. Aus den Winkeln, welche die 3 Bahnen miteinander bilden, und aus den Längen der 2 weitergehenden Bahnſtrecken, die ein Maß für die Geſchwindigkeit geben, zeigte ſich, daß der Verlauf in den meiſten Fällen einem Stoß mit Erhaltung des Schwerpunkts und der lebendigen Kräfte, einem „elaſtiſchen Stoß" (M 278), zwiſchen dem α-Partikel und dem Atomkern entſpricht unter der Annahme, daß die Moleküle H_2, O_2 dabei in ihre Atome zerfallen und daß nahe

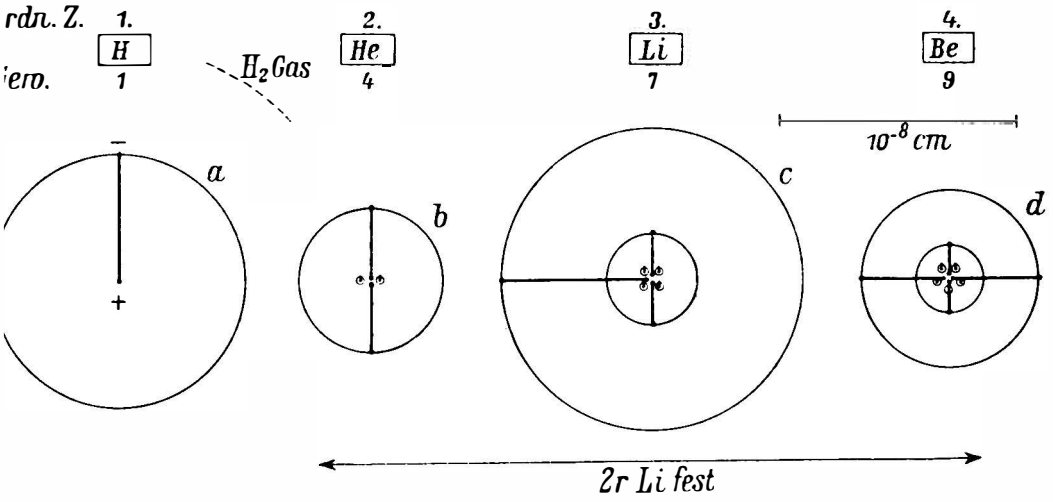


Abb. 120. Atombilder.

die ganze Maſſe des Atoms im Kern enthalten iſt (538). Anders verlaufende Nebelſpuren erfordern eine beſondere Erklärung (573).

Weitere Auskünfte über die Kerne der verſchiedenen Atome liefert das Studium der radioaktiven Erſcheinungen und der Umwandlung der Elemente (556, 569, 572—575).

541. Atombilder. — Einen ſchematiſchen Überblick des fürs Atominnere einigermaßen Feſtgeſtellten (520, 529—538) gibt Abb. 120. Es ſind die 4 niedrigſten Atomgewichte (Ordnungszahlen 1—4), die einfachſten Atome, ausgewählt. Das Atombild des Waſſerſtoffs (Abb. 120a) iſt auch das allgemeine Bild einer Dynamide. Das Kraftfeld zwiſchen dem Proton (+) und dem Elektron (—) iſt durch eine einzige, gradlinige elektriſche Kraftlinie angedeutet, die als Radius zu einer angenommenen Kreisbahn (535) des Elektrons gezeichnet iſt. Die Dynamiden in den anderen Atomen der Abb. 120 haben verſchiedene andere Abmeſſungen (vgl. 542), jeweils durch die Länge der Kraftlinie erſichtlich. Alle Protonen je eines Atoms ſind in deſſen Mittelpunkt, dem Kern des Atoms, nahe

vereinigt gezeichnet, wie es der angegebenen Erfahrung entspricht (538, 540). Den absoluten Größenabmessungen (vgl. den Maßstab r. ob. in der Abb., sowie die Größenangaben für das H_2-Molekül und für das Li-Atom im festen Zustand) der gezeichneten kreisförmigen Elektronenbahnen ist keine ernste Bedeutung zuzuschreiben; sie geben nur ungefähr die Räume für den Aufenthalt der betreffenden Elektronen an; sie sind auf die Spektrallinien der Atome gegründeten Rechnungen (544) entnommen, stimmen aber nicht mit anderen Erfahrungen über die betreffenden Atome (vgl. 545). Überhaupt sind bestimmte Elektronenbahnen in den Atomen keineswegs gesichert; vielleicht bedeuten die gezeichneten Kreise ganz andere Bewegungen oder besondere Anordnungen, Lagen oder Zustandswechsel jener Energiemassen im Atom, die nach Befreiung aus demselben als Elektronen bekannt sind[1]). Doch ist es gut gesichert, daß in den schweren Atomen Unterschiede gemacht werden müssen (s. 542) zwischen kernnäheren und kernferneren, mehr inneren und mehr äußeren Elektronen, was in den Abbildungen durch die verschieden großen Kreise, z. B. bei Li oder Be (Abb. c bzw. d) zur Darstellung kommt.

So wie zu Abb. 120 bemerkt, zeigen auch alle sonst bisher erdachten, verschiedenartigen Atombilder oder Atommodelle ihre Mängel, sobald man sie den vielen vorhandenen Erfahrungen über die Atome gegenüberstellt, die jeweils beim Erdenken der Bilder nicht unmittelbar berücksichtigt worden sind (s. 545).

542. Verschiedene Dynamiden der Atome. — Da der Kern nahe die ganze Atommasse enthält (538, 540), so muß er sämtliche Protonen aller Dynamiden des Atomes enthalten, d. i. so viele Protonen als das Atomgewicht anzeigt (532). Wenn aber die positive Ladung des Kerns nur der Ordnungszahl (521), die kleiner ist, entspricht (538), so muß der Kern außer den sämtlichen Protonen auch noch einen Teil der Elektronen des Atoms enthalten. Der Rest der Elektronen, deren Zahl dann gleich der Ordnungszahl ist, muß dann außerhalb des Kerns im Atomraum sich befinden. Besteht das ganze Atom aus Dynamiden (531), so sind die im Kern befindlichen Elektronen dort mit Protonen zu entsprechend kleinen „Kerndynamiden" vereinigt zu denken. Diese Ergebnisse sieht man in den Abb. 120 b, c, d für die leichtesten Atome (Ordnungszahlen 2—4) gezeigt; die Kerndynamiden erscheinen dabei als kleine Kreise (sehr verkleinerte Bilder des H-Atoms, Abb. 120a). Die Zahl der Kerndynamiden ist überall gleich der Differenz von Atomgewicht und Ordnungszahl. Die Zahl der anderen Dynamiden, deren Elektronen weiter außen sind und deren jede durch ihre entsprechend längere, radial gezeichnete Kraftlinie kenntlich ist, ist überall gleich der Ordnungszahl. Man kann diese Dynamiden „Umgebungsdynamiden" nennen. Daß diesen Dynamiden in Abb. 120 c, d zweierlei verschieden große Kreise für ihre Elektronen zugewiesen sind, dies ist dadurch begründet, daß außerhalb des Kerns im allgemeinen noch zwischen äußeren und inneren Teilen des Atoms zu unterscheiden

[1]) Selbstverständlich kann es auch nicht zutreffen, daß alles was zum Atom gehört oder in ihm geschieht in einer Ebene läge; denn die Atome haben sich immer als räumliche Gebilde gezeigt. Atombilder wie Abb. 120 sind in dieser Beziehung verwandt der alten „Strukturformel" des Benzolmoleküls, die auch Wesentliches bot, ohne daß ihre ebene Anordnung ernst zu nehmen war. Räumliche Atombilder sind erdacht; sie warten aber ebenso wie Abb. 120 noch auf weitere Entwicklung.

ist, weshalb wir die Umgebungsdynamiden in „Außendynamiden" und „Mitteldynamiden" teilen. Solche Unterscheidung ist in mancherlei Weise angezeigt, am deutlichsten wohl in den Wellenaussendungen der Atome (s. 526). Wir sahen, daß gewisse, den Atomen eigene Spektren ganz unabhängig von der Umgebung und selbst von molekularer Bindung der Atome in scharfen Linien, d. i. ungestört, erscheinen (O 81, 86, 105, E 502), während andere Spektren zu solchem Erscheinen den Gaszustand und zwar bei nicht zu großer Dichte erfordern (O 80), und wir vermuteten danach, daß erstere Spektren mehr in dem inneren, wohl den Kraftfeldern der Umgebung entzogenen Teilen der Atome, letztere mehr in den äußeren, diesen Kraftfeldern ausgesetzten Teilen der Atome ihren Aussendungsort haben dürften. Sind hiernach nur die äußeren Teile der Atome von der Umgebung beeinflußt, so entspricht es der Vertauschbarkeit von Kraft und Gegenkraft (M 209), diese Teile auch als Sitz der Kräfte anzunehmen, welche die Umgebung beeinflussen. Dies hat auch die Untersuchung der Wirkungsweiten von Flüssigkeitsmolekülen gezeigt (M 342). Die Molekularkräfte und die chemischen Kräfte (525, M 246 u. f.) sind demnach den Elektronen der Außendynamiden zuzuschreiben. Diese äußeren Elektronen sind es, welche mit den nach den Erfahrungen der Elektrolyse schon anzunehmenden Valenzelektronen (E 182, 192) für identisch zu halten sind. Dementsprechend ist das einwertige Wasserstoffatom eine einzige Außendynamide, mit deren Kraftfeld es z. B. ein Cl-Atom binden kann. Helium bindet in gewöhnlichem Zustand keine Atome, es hat die Valenz Null (s. die Atomtabelle, 568); seine beiden Umgebungsdynamiden (Abb. 120b) sind als Mitteldynamiden aufzufassen. Lithium ist einwertig; es hat dementsprechend nur eine Außendynamide (Abb. 120c), wie H. Beryllium, zweiwertig, hat 2 Außendynamiden (Abb. 120d). Die Außendynamiden können auch „Valenzdynamiden" genannt werden (vgl. dazu 570). Die Außenlage ihrer Elektronen stimmt mit ihrer besonders leichten Abtrennbarkeit, die bei der Ionenbildung der Elektrolyte sich zeigt (182). Atome, denen diese Elektronen fehlen, können keine Moleküle bilden; dem entspricht der Molekülzerfall in Gasen, die der Trägerbildung, d. i. Elektronenverlust ausgesetzt sind (518). Weiteres, Elemente höherer Ordnungszahl betreffend, s. unter 570.

Die Außenelektronen sind danach überhaupt maßgebend für die meisten sinnlich unmittelbar wahrnehmbaren Eigenschaften der Atome. Daß beispielsweise das metallisch feste, glänzende, elektrisch leitende Magnesiummetall, wenn es zu dem pulvrigen, mattweißen, nichtleitenden Magnesiumoxyd verbrannt wird, so völlig seine Eigenschaften verändert, obgleich die Magnesiumatome im Oxyd noch vorhanden sind, dies ist allein nur Folge der verschiedenen Betätigung der Valenzelektronen der Magnesiumatome. Im Metall sind diese Elektronen teils durch Nähewirkung frei (511), teils an den Atomen verfügbar; im Oxyd sind sie sämtlich zur Bindung der Sauerstoffatome beansprucht und an diesen festgehalten (192).

542a. Neutronen. — Es liegen Beobachtungen vor, welche auf Entweichen der vorbetrachteten Kerndynamiden aus Atomen (Li, Be) gedeutet werden. Man hat die zur Erklärung der Beobachtungen angenommenen, elektrisch neutralen, wie sehr kleine Dynamiden sich verhaltenden Massen „Neutronen" genannt. Man erhält „Neutronenstrahlen" durch Einwirkung von α-Strahlen (550) auf Li oder Be. Sie geben viele Atomumwandlungen, auch Auslösung von Elektronen oder γ-Strahlen (552) in Materie, auf die sie fallen (575 a), und dies ist bisher

ihr Hauptnachweis. Unmittelbare Nebelspuren geben sie nicht; doch besitzen sie photographische Wirksamkeit. Sie sind sehr durchdringend, werden aber besonders von wasserstoffhaltigen Verbindungen (Paraffin, Wasser) teilweise absorbiert, wobei sie zuletzt geringe Geschwindigkeiten annehmen, die man sogar aus Weg- und Zeitmessungen ermitteln konnte. Als Dynamiden kommt den Neutronen eine dem Wasserstoffatom nahe gleiche Masse zu.

543. Die Unterschiede der Isotopen (518) können nur im Kern liegen. Denn Isotope haben ganz oder sehr nahe gleiche chemische Eigenschaften und auch nahe gleiche Molekularkräfte, was gleiches Äußere der Atome bedeutet (542), sie haben dementsprechend auch gleiche Ordnungszahl (521), gleichviel Umgebungsdynamiden, und damit gleiche Kernladung (vgl. 538). Da sie dennoch wegen der verschiedenen Gewichte entsprechend verschiedene Dynamidenzahlen enthalten müssen, kann es nur die Zahl der Kerndynamiden sein, die sie unterscheidet. Dem Wasserstoffisotop mit dem Atomgewicht 2 beispielsweise, ist eine Kerndynamide zuzuschreiben als Zusatz zum gewöhnlichen Wasserstoffatom, das keine hat.

544. Rechnungen über das Atominnere. — Die reichlichen Zahlenangaben über gemessene Wellenlängen der Lichtemission der Atome mit den sie verbindenden Serienformeln (526) und die ebenfalls zahlenmäßige Angabe über die Energiequanten (527), deren Größe mit den Wellenlängen zusammenhängt, haben Mathematiker veranlaßt, Rechnungen über das Atominnere anzustellen. Dabei ist außer diesen Zahlenangaben nur wenig von den sonstigen, die Atome betreffenden Kenntnissen verwertet worden; ein Streben nach Zusammenfassung dieser Kenntnisse ist in den vorliegenden Leistungen der Mathematiker überhaupt nicht merklich. Die Rechnungen stehen vielmehr den Wirklichkeiten meist willkürlich, teils sogar fremd gegenüber; sie richten sich vorwiegend nach Äußerlichkeiten und rein rechnerisch-formellen Möglichkeiten oder Analogien. Sie gehen sämtlich davon aus, daß die Atome bei der Lichtemission quantenmäßig arbeiten und daß eine Änderung der Elektronenzustände im Atom damit verbunden ist, was allerdings beides gut gesichert ist (527, 528). Es werden dazu verschiedene Nebenannahmen gemacht, um rechnungsmäßig zu den experimentell ermittelten Spektralserienformeln (O 83) der Elemente zu kommen. Da die Aussendung jeder Spektrallinie ein Herabsinken des Energieinhaltes des Atoms um eine bestimmte Stufe, nach Maßgabe des Energiequants der betreffenden Wellenlänge bedeutet (W 182), beziehen sich die Rechnungen in der Hauptsache auf Energiestufen, die dem betreffenden Atom zugehören. Man kam so für jedes Atom zu einem Schema, bestehend aus einer Anzahl horizontaler Linien verschiedener Höhenlage, Energiestufen darstellend, und die Wellenlängen werden den Übergängen von einer Stufe zu einer anderen zugerechnet. Dies hat geholfen, Übersicht in die oft sehr linienreichen Spektren zu bringen (seit 1913). Dabei ist man zunehmend rein schematisch verfahren, ohne weiter viel an das Atom zu denken[1]). Hat man auch teilweise Vorstellungen über die Zustände der Elektronen im Atom zu Hilfe genommen, so sind dieselben doch ganz hypothetisch, und sie lassen auch die Entstehungsweise der Lichtwellen beim Übergang von einer Energiestufe zur anderen im Dunkeln.

545. Weiter verfügbare Erfahrung. — Nur bei Vergegenwärtigung von allem über die Atome Bekannten wird man den offenbar fehlenden, dem Atominneren angemessenen Begriffen näher kommen, vor allem auch guten Weg sehen zu naturhingegebenem, von vorgefaßten „Theorien" unbeeinflußtem, beobachtendem Weiterforschen. Alle bisherigen Rechnungen und Überlegungen über das Atominnere benutzen jeweils nur einen Teil der vorhandenen Kenntnisse von den Atomen.

Meist unbenutzt geblieben sind die doch sehr charakteristischen Kenntnisse über die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kathodenstrahlabsorption sowohl im groben, im

[1]) Man kann diese schematischen Rechnungen mit Spektren die „Börsianer-Optik" nennen, weil sie ebensowenig mit den Vorgängen im Atom sich befassen, das die Spektren liefert, wie die Gedanken jener Menschen mit den Vorgängen in den Fabriken, von denen sie bloß „Papiere" verhandeln.

ganzen Geschwindigkeitsbereich, als auch im einzelnen, ebenso der Verlauf der Sekundärstrahlung und die massenproportionale Diffusion[1]), überhaupt die in den Abschn. 488—497 behandelten Wirkungen der Atome auf Elektronen. Man begnügt sich mit mathematischen Versuchen und vernachlässigt sogar weiter eindringende experimentelle Erforschung der erwähnten Atomwirkungen auf Elektronen.

Auch die Kenntnisse über Molekularkräfte, d. i. über die Kraftfelder der Umgebung der Atome (525) sind den Atombildern oder Rechnungen nicht einverleibt; es wäre aus den vorhandenen Vorstellungen oder Rechnungen über das Atominnere nicht einmal zu erraten, daß es außer dem gasförmigen und festen Aggregatzustand so etwas wie Flüssigkeiten geben könne. Die guten Kenntnisse über die gaskinetischen Abmessungen der Atome und Moleküle (522) stehen den Atomrechnungen meist so fern, daß kaum die Frage nach der gegenseitigen Undurchdringlichkeit der Atome in Erwägung kam[2]).

Aber selbst in bezug auf die meist in erster Linie benutzten Erfahrungen über Lichtemission genügen die Atomrechnungen mit ihren Energiestufen nicht vollständig. Sie machen die durch Beobachtungen am elektrischen Bogen festgestellte Abhängigkeit des Erscheinens der verschiedenen Serien der Metallspektren von der Temperatur (O 82) nicht verständlich.

Weit besser als mit der Erforschung der Vorgänge im Elektronenraum der Atome (vgl. 541) steht es mit der Erforschung der Kerne. Man hat hier reichen, noch fortlaufend sich vermehrenden Zuwachs von Kenntnis aus dem experimentellen Studium der Atomumwandlungen (572ff.) zur Verfügung, das teils unmittelbare Auskünfte gibt. Vielleicht wird von da aus, ungestört durch sehr willkürliche Hypothesen, besserer Fortschritt möglich sein.

546. Die Kraftfelder des Atominneren. — Das Bestehen elektromagnetischer Kraftfelder innerhalb der Atome ist durch die Diffusion und Absorbtion der Kathodenstrahlen und durch deren Abhängigkeit von der Geschwindigkeit angezeigt (520, 525, 459). Den a-Strahlen gegenüber zeigten sich die Kräfte der Kerne elektrostatisch in nicht zu kleinem Abstand Coulombs Gesetz entsprechend (539). Die Einzelheiten des Verhaltens des Atominneren gegenüber eindringenden Elektronen (487 u. f.) sind jedoch aus dem durch die Kraftlinien beschreibbaren Eigenschaften der außerhalb der Atome bekannten elektromagnetischen Felder nicht verständlich, ebensowenig wie der Zusammenhalt der Teile der Atomkerne und deren explosionsartiger radioaktiver Zerfall (556 u. f., 572—575). Um so mehr ist es bemerkenswert, daß alle wohlbekannten elektromagnetischen Felder, die außerhalb der Atome in Benutzung sind, doch nur aus Atomen stammen (129); es sind das nur elektrische Felder der aus Atomen stammenden Elektronen (529) und die durch Bewegung der Kraftlinien dieser Felder entstehenden magnetischen Felder (257, 328). Der Unterschied der bekannten äußeren Felder gegen die unbekannten Felder des Atominnern kann demnach wohl nur in gewissen zusätzlichen Eigenschaften der letzteren liegen. Als eine solche zusätzliche Eigenschaft ist die Quantenmäßigkeit der Energieverteilung der Felder erkannt (527), von der außerhalb der Atome nichts merklich geworden ist (W 182), — ein Unterschied, der vielleicht mit der außerordentlichen Größe der Energiedichte in den Atomen (580) zusammenhängt. Diese große Energiedichte ist aber auch im Atominneren nicht gleichmäßig vorhanden, sondern mit ihren Höchstwerten auf die äußerst kleinen Räume be-

[1]) Neuere Untersuchungen geben dazu noch Kenntnisse über das Verhalten von positiv geladenen Atomen gegenüber Elektronen und über das Verhalten von Atomen (Molekülen), die von schnell bewegten elektrisch geladenen Atomen getroffen werden.

[2]) Im allgemeinen kann die Undurchdringlichkeit in Zusammenhang gesehen werden mit der großen Energieanhäufung in den Atomen (580); denn Energiedichte bedeutet Druck (M 376), und die Undurchdringlichkeit bedeutet sehr großen Druck gegen Volumänderung.

schränkt, die man auch als Eigenräume der Elektronen und Potronen bezeichnen kann (532, 534, 539). Dort ist wohl der Hauptsitz des Unbekannten. Das Wasserstoffatom als einzelne Dynamide (532) zeigt, daß das Unbekannte schon im einzelnen Dynamidenfeld, am Proton und Elektron, liegen muß, im besonderen die Wellenhervorbringung, wie aus großem Oszillator (526), mit dem Ergebnis der bekannten Spektrallinien, quantenhaft in noch gar nicht eingesehener Weise verlaufend.

Unter den schon beigebrachten Mitteln, dem Atominneren näher zu kommen, sind besonders zwei weitgehend durchgeführte Beobachtungsweisen zu nennen: Untersuchung der Lichtemission (und Absorption) der Atome in magnetischen Feldern (Zeeman-Effekt, 1896) und in elektrischen Feldern (Stark-Effekt, 1913). Die Wirkung dieser über die Atomfelder gelagerten äußeren Felder besteht stets in Aufspaltung der einzelnen Spektrallinien der Atome in Gruppen von Linien. Die Gruppen fallen verschieden aus, je nachdem die Lichtaussendung parallel oder senkrecht zur äußeren Feldrichtung erfolgt, und das Licht der einzelnen Linien zeigt sich teils polarisiert. Einige beobachtete Fälle stimmen mit dem überein, was bei schwingenden, Wellen aussendenden Elektronen im Magnetfeld schon nach Bekanntem zu erwarten wäre; meist sind die Aufspaltungen aber viel verwickelterer Art. Die Versuche, aus diesen Beobachtungen Auskünfte über die Vorgänge im Atom zu errechnen, sind wohl noch lange nicht abgeschlossen. Dasselbe gilt von Beobachtungen an Atomstrahlen und Molekülstrahlen (W 87), die in (inhomogenen) elektrischen und magnetischen Feldern bemerkenswerte Ablenkungen zeigen.

Allenthalben scheinen für das Atominnere passende Begriffe noch zu fehlen; sie werden wohl erst weiterer Naturbeobachtung zu entnehmen sein.

Da die ganze Atommasse als Energiegebilde erscheint (583), könnte vor allem die noch zu wenig beachtete, aber als vorhanden ersichtliche innere Beschaffenheit der Energie (129, 587) den Hauptschlüssel zum Begreifen des Atominneren abgeben. Die fehlende Kenntnis der Kraftfelder der Dynamiden ist wohl Frage der besseren Kenntnis der Energie überhaupt.

2. Radioaktivität.

Die radioaktiven Strahlungen.

547. „Uranstrahlen". — Nach der erfolgreichen und ergiebigen Untersuchung der Kathodenstrahlen, der positiven Strahlen und der Hochfrequenzstrahlen begann ein Suchen nach weiteren neuen Strahlungen. Dabei ergab sich unter viel Wertlosem eine Beobachtung, die, mit Gründlichkeit durchgeführt und weiter verfolgt, wirklich wesentlich Neues brachte. Es zeigte sich, daß Uranverbindungen auch durch Metallblätter, die nicht nur lichtdicht, sondern auch luftdicht waren, die photographische Platte schwärzen[1]) und zwar mit

[1]) Es wurde meist mittels der photographischen Platte gesucht und zuerst fast alles, was dieselbe in unerklärter Weise schwärzte, als neue Strahlung benannt. Ging die Wirkung durch Metallblätter, so waren dieselben doch meist löcherig, und man ließ sich durch spurenweise vorhandene, die photographische Schicht angreifende, durch die Löcher dringende Dämpfe (wie H_2O_2) täuschen.

Schattenwurf hinter dickeren Metallstücken, daß also eine Strahlung von diesen Verbindungen ausgeht, die ungefähr wie Kathodenstrahlen oder Hochfrequenzstrahlen sich verhält. Dem entsprach es, daß die Uranverbindungen auch die Eigenschaft zeigten, die Luft in ihrer Nähe elektrisch leitend zu machen, was man mit Recht einer von ihnen ausgehenden, unsichtbaren Strahlung zuschrieb.

Es war eine unerwartete Tatsache, daß so lange schon bekannte Stoffe, wie die Uranverbindungen, die Eigenschaft besitzen, ein geladenes Elektroskop in ihrer Nähe zur Entladung zu bringen. Mit Hilfe dieser Eigenschaft war aber weiter leicht quantitativ vorzugehen, indem man die Entladungsgeschwindigkeit aus gegebenem Abstand bei bestimmter Stoffschicht als Maß für die Intensität der Strahlung des Stoffes, kurz für seine „Radioaktivität" benutzte. So zeigte es sich, daß alle Uranverbindungen, sowie auch reines, metallisches Uran nach Maßgabe des Urangehaltes „aktiv sind", woraus zu schließen war, daß die Strahlung dem Uranatom zugehöre und ihm ohne Rücksicht auf chemische Bindung eigen sei.

548. Radium. — Außer Uran zeigte unter den anderen, damals schon bekannten Elementen nur noch das seltenere Thor gut merkliche Radioaktivität[1]). Neues zeigten dagegen Mineralien, darunter besonders das Hauptausgangsmineral für die Urangewinnung, die Pechblende (Uranpecherz). Sie zeigte stärkere Aktivität als ihrem Urangehalt entspricht, woraus zu schließen war, daß sie außer dem Uran noch einen anderen, besonders stark aktiven, unbekannten Stoff oder deren mehrere enthalten müsse. Die Feststellung dieser Stoffe war verhältnismäßig einfach, indem bloß die bekannten Trennungsverfahren der chemischen Analyse am gelösten Mineral durchzuführen waren, um jede der abgeschiedenen Elementgruppen gesondert am Elektroskop prüfen zu können (547) und danach noch weitere Trennungen vorzunehmen. In dieser Weise fanden sich in der Pechblende mehrere neue, nur spurenweise vorhandene, aber viel stärker als Uran radioaktive Elemente, darunter besonders das nach dieser, seiner auffallenden Eigenschaft benannte Radium (Zeichen Ra).

Das Radium wird bei der Analyse in der Gruppe der Erdalkalien — Ca, Sr, Ba — abgeschieden, zu welcher es demnach auch gehört (siehe die 3. Spalte in der Atomtabelle, 568, in welcher die vier chemisch gleichartigen Elemente Ca, Sr, Ba, Ra nach links abgerückt verzeichnet sind). Die Abtrennung des Ra von den anderen Erdalkalien gelang durch die verschiedene Löslichkeit der Chloride. $CaCl_2$ ist zerfließlich, $SrCl_2$ gut wasserlöslich, $BaCl_2$ schwer löslich und $RaCl_2$ noch schwerer löslich; wiederholtes Auskristallisieren führt daher zur Anreicherung des Radiums im Chloridgemisch. Man kann aus 10 Tonnen Pechblende nur etwa 1 gr Radium gewinnen.

Es zeigte sich, daß das Radium mit Recht als besonderes Element zu betrachten ist; denn es zeigte ein besonderes Emissionsspektrum im Funken. Mit dem Vorhandensein wägbarer Mengen wurde auch sein Atomgewicht, 226, feststellbar. Radium ist mehrmillionenmal radioaktiver als Uran;

---

[1]) Schwache Aktivität wurde später noch bei Samarium, Kassiopeium und auch bei Rb und K festgestellt. Diese schwachen Aktivitäten scheinen in sehr geringen Mengen vorhandenen Isotopen der betreffenden Elemente zuzugehören.

seine Strahlung erleuchtet hell einen Phosphoreszenzschirm, was Uran und Thor nicht zu leisten vermögen.

549. Natur der radioaktiven Strahlungen. — An einigermaßen angereicherten Radiumpräparaten wurde endlich (von 1900 an) auch die Natur der ausgesandten Strahlen ordentlich untersucht. Es war nur nötig, die an den Kathodenstrahlen schon erprobten Methoden (452 u. f.) anzuwenden, und die Durchführung in reinen Versuchen war mit den dauernd von selbst tätigen Strahlenquellen sogar verhältnismäßig einfach.

Es zeigte sich aus dem Verhalten der Strahlen im magnetischen und im elektrischen Feld, daß sie von nicht einheitlicher Beschaffenheit sind. Dreierlei Strahlen sind im allgemeinen — auch in der „Uranstrahlung" — gemischt vorhanden; sie werden mit den Buchstaben α, β und γ bezeichnet.

550. Die α-Strahlen sind positive Strahlen gleich den Kanalstrahlen (517); jedoch sind sie nicht, wie letztere, beliebige Atome von positiver Ladung, sondern, wie das Folgende zeigt, stets Heliumatome, die zwei Elektronen verloren, also zwei Protonen im Überschuß haben (d. i. Heliumkerne, bestehend aus 2 Kerndynamiden und 2 Protonen, vgl. 542 und Abb. 120), auch „α-Partikel" genannt. Ihre magnetische Ablenkbarkeit ist gering, entsprechend der großen Masse und den meist sehr großen Geschwindigkeiten. Letztere sind je nach dem strahlenden Stoffe verschieden, meist zwischen etwa $1{\cdot}4$ und $2{\cdot}3 \cdot 10^9$ cm/sek liegend. So große Geschwindigkeiten sind bei den künstlich erzeugten Kanalstrahlen, selbst bei Wasserstoff, schwer erreichbar.

Vermöge dieser Geschwindigkeit gehen die α-Partikel auch durch luftdichte Wände von genügender Dünne, wie die schnellen Kathodenstrahlen. So war es möglich, mit den α-Strahlen denselben entscheidenden Versuch auszuführen, der für die Kathodenstrahlen gezeigt hatte, daß sie nichts Materielles sind (452); man konnte α-Strahlen ins vollständige Vakuum treten lassen, um zu sehen, ob sie sich darin ausbreiten, ob sie Materie mitbringen oder sonst besonderes ergeben. Es zeigte sich, daß sie Heliumgas ins Vakuum liefern, was durch elektrische Entladungen und das Spektrum von deren Licht leicht unzweifelhaft nachweisbar war.

Treffen die α-Strahlen im Vakuum auf dickes Blei, das sie absorbiert, so erweist sich das Blei nachher heliumhaltig; es entweicht Heliumgas aus dem Blei, wenn es im Vakuum geschmolzen wird. Durch diese Nachweise ist es gesichert, daß das aus den Ablenkungsversuchen berechnete Verhältnis von Ladung zu Masse der α-Partikel wirklich doppelt geladenen Heliumatomen entspricht, nicht etwa einfach geladenen H_2-Molekülen oder etwa 8fach geladenen O-Atomen, was sonst möglich wäre.

Auch spätere Untersuchungen an den α-Partikeln verschiedener radioaktiver Stoffe zeigten nichts anderes. Radioaktive Präparate, die α-Strahlen abgeben, erweisen sich, entsprechend der Absorption der Strahlen in ihrem eigenen Stoffe, stets als heliumhaltig (vgl. 567).

Die kinetische Energie eines einzelnen α-Partikels ist genügend groß, um einen geeigneten Phosphoreszenzschirm am Auftreffpunkt zum Aufleuchten zu bringen. Man kann in dieser Weise α-Partikel zählen, was an sich höchst bemerkenswert ist als eine Zählung einzelner Atome. Mißt man außerdem

die elektrische Ladung, welche der Auffangeschirm durch die gezählten α-Partikel erhält, so berechnet man unmittelbar die Ladung je eines α-Partikels. Sie findet sich in der Tat gleich 2 Elementarquanten. Dies ist eine der schon vielen Bestätigungen der erkannten Natur der α-Strahlen; es ist aber auch zugleich eine der genauest durchführbaren Ermittelungsweisen des elektrischen Elementarquants, zudem ein besonderer Nachweisfall der allgemeinen Einheitlichkeit der Elementarquanten der Elektrizität.

Auch mit dem Spitzenzähler (513) können α-Partikel gezählt werden.

551. Die β-Strahlen sind ebenfalls magnetisch und elektrisch ablenkbar, nur nach der anderen Seite und viel mehr als die α-Strahlen. Sie zeigten sich in jeder Beziehung gleich Kathodenstrahlen. Die Geschwindigkeiten sind nicht einheitlich; aber es kommen sehr große Geschwindigkeiten vor, bis nahe an Lichtgeschwindigkeit. So schnelle Elektronen können große Luftstrecken durchlaufen; treten sie in einen Spitzenzähler (513), so gibt schon jedes einzelne Elektron als Trägerquelle seine Anzeige durch Entladung, und dies ist ein Mittel zur Zählung von Elektronen. Wir nennen die durch große Geschwindigkeit ausgezeichneten, von radioaktiven Stoffen kommenden Elektronen auch kurz „β-Elektronen".

552. Die „γ-Strahlen" sind nicht ablenkbar. Die Kristallspektroskopie (O 160) zeigte sie als Wellenstrahlen, gleich den Hochfrequenzstrahlen (499). Die Wellenlängen sind nicht einheitlich; es kommen aber kürzere Wellen vor als künstlich mittelst Kathodenstrahlen an Antikathoden erzeugt werden. Die Wellenskale Abb. 95 (430) zeigt sie als die kürzesten bisher sicher festgestellten elektromagnetischen Wellen.

Es hat sich gezeigt, daß γ-Strahlen eine Begleiterscheinung der Aussendung von α- oder β-Strahlen sind; wir werden daher im folgenden nur diese beiden Strahlenarten bei den Stoffen, die sie aussenden, besonders angeben.

Die außerordentliche Kürze der Wellen der γ-Strahlen, somit Größe ihrer Schwingungszahlen n, bedeutet außerordentlich große Energiequanten $h \cdot n$, in welchen nach allgemeiner Erfahrung (W 181) die Aussendung von den Atomen zu erwarten ist. Diese Erwartung stimmt überein mit den überhaupt sehr großen Energiemengen, die das Atom bei seinen Strahlungen meist abgibt. Es ist z. B. die kinetische Energie eines α-Partikels mittlerer Geschwindigkeit 10^{-5} erg, die eines β-Elektrons von 0·95 Lichtgeschwindigkeit (1·1 Millionen Voltgeschwindigkeit) rund $2 \cdot 10^{-6}$ erg. Das Energiequant hn für die kurze γ-Wellenlänge 0·004 μμ ist aber doch nur $5 \cdot 10^{-7}$ erg, wonach die Energie der γ-Strahlaussendung gegen die der zugehörigen β- oder gar α-Strahlaussendung etwas zurücktritt, was auch mit den gemessenen Wärmewirkungen der Strahlungen (554) stimmt.

Es ist wohl als sicher anzunehmen, daß die Aussendung der γ-Strahlen von je einem Atom einzeln erfolgt, da dies für die Aussendung der zugehörigen α- und β-Strahlen durch die Zählungen (550, 551) gut festgestellt ist. Dann aber liegt bei den γ-Strahlen der bemerkenswerte Fall vor, daß die Energiequanten hn der Aussendung in der fertigen Ausstrahlung einzeln erhalten sich finden müssen als Energien kohärenter Wellenzüge (s. 473), deren jeder vielleicht beschränkte Frontbreite hat, im Gegensatz zu den Wellenzügen des sichtbaren Lichtes, die wohl immer dem Zusammenwirken vieler Atome entspringen und in welchen keinerlei quantenmäßige Unterteilung merklich ist (O 161, 165).

553. Die Absorption der drei Strahlenarten in der Materie ist ihrer Beschaffenheit entsprechend sehr verschieden; man kann sie daher durch geeignete Schirme ganz oder teilweise trennen. Die α-Strahlen werden schon in nicht

allzu dünnen Hüllen der Präparate ganz zurückgehalten; weit weniger absorbierbar sind die schnellen β-Strahlen; am durchdringendsten sind die kurzwelligen γ-Strahlen.

554. Ursprung der Energie der Strahlen. — Diese drei Strahlenarten von so extremen Eigenschaften, wie sie künstlich selbst bei großem Energieaufwand nicht herstellbar waren und sind, werden von den Atomen der radioaktiven Elemente ausgesandt. Es zeigte sich das schon beim Uran (547) und dann auch beim Radium. Es war zur Zeit dieser Entdeckungen höchst erstaunlich, daß so kleine Gebilde wie die Atome die Möglichkeit solcher Energieleistungen haben sollten. Die Größe der Energie, welche in den Strahlungen zur Verausgabung kommt, konnte leicht gemessen werden, wenn das radioaktive Präparat in einer Hülle, die die Strahlen absorbiert, in ein Eiskalorimeter (W 52) gebracht wird. Es erscheint dann die Gesamtenergie der Strahlen als meßbare Wärme. Es zeigt sich so, daß 1 gr Radium (mit Einschluß seiner alsbald zu betrachtenden Umwandlungsprodukte) stündlich ungefähr 140 Grammkalorien Wärme abgibt, und diese Wirkung dauert an. In der Tat halten sich starke Radiumpräparate infolge der Absorption ihrer Strahlung in ihrem eigenen Stoffe auf leicht merklich erhöhter Temperatur.

Die Frage nach dem Ursprung dieser Energiemengen war nicht unmittelbar zu beantworten. Nur die andauernde, eingehende Verfolgung der Fülle von Erscheinungen, welche die verschiedenen radioaktiven Präparate boten, geleitet von der Erkenntnis der Natur ihrer Strahlungen, hat zum Ziele geführt.

Wir erläutern zunächst die dabei verfolgten Gedankengänge und die gewonnenen Ergebnisse (555—557). Nachher gehen wir auf diejenigen Einzelheiten ein, deren Kenntnis zum Verstehen der Sicherung der Ergebnisse erforderlich ist (558—566).

Für vermutete äußere Quellen der Energie, so daß dieselbe etwa in einer unbekannt gebliebenen, überall verbreiteten Strahlung den radioaktiven Atomen fortdauernd zukäme, indem sie von diesen vorzugsweise absorbiert würde, hat sich gar kein Anhaltspunkt ergeben. Es mußte, bei Gültigkeit des Energiegesetzes, die Energie in den radioaktiven Atomen selbst vorhanden und sogar in großer Menge in ihnen vorrätig angenommen werden. Dies wurde auch naheliegend, als schon die Erkenntnis der Natur der Kathodenstrahlen zusammen mit ihrer bekannten Beeinflussung durch die Atome, Diffusion und Absorption, elektromagnetische Felder im Inneren der Atome gezeigt hatte (445); denn der Energieinhalt elektromagnetischer Felder war bekannt (123, 274).

Atomzerfall.

555. Die Strahlungen bedeuten Atomzerfall. — Stammt die Energie der Strahlungen aus den Atomen, so können dieselben bei der beobachteten dauernden Energieabgabe nicht unverändert bleiben. Dies hat sich auch durchaus bestätigt. Alle radioaktiven Atome sind, solange sie strahlen, in dauernder Umwandlung begriffen. Die Abgabe von α-Strahlen, d. i. Heliumatomen, aus Radiumatomen oder anderen radioaktiven Atomen bedeutet schon einen Zerfall dieser Atome. Ein abgegebenes He-Atom muß das Atomgewicht um 4 erniedrigen; es ist also aus dem ursprünglichen Atom ein He-Atom und ein

Atom eines Elements verringerten Atomgewichts entstanden. Der so aus der Erkenntnis der Natur der α-Strahlen gewonnene Gedanke, die Radioaktivität als einen Vorgang *selbsttätigen Atomzerfalls* zu betrachten, dessen Symptom die Strahlungen sind, hat sich durchaus bewährt. Auch der große Energieverlust des Atoms, das ein β-Elektron mit dessen außerordentlich hoher Geschwindigkeit abgibt, verändert das Atom vollständig in seinen Eigenschaften, ohne daß allerdings in diesem Falle — entsprechend der geringen Elektronenmasse — das Gewicht so wesentlich verringert wird wie bei der Abgabe eines α-Partikels.

Dieser durch die Strahlungen verfolgbare Atomzerfall erfolgt mit gleicher Geschwindigkeit bei höchsten wie bei tiefsten Temperaturen und auch unabhängig von chemischer Bindung (547), Aggregatzustand, Konzentration und anderen Einflüssen der Umgebung. Die Atome der radioaktiven Elemente zeigen sich somit nicht durch Wirkung der Umgebung, sondern aus *innerlichen Ursachen als unbeständig*; sie schleudern von selber explosionsartig α-Partikel oder β-Elektronen aus, wonach sie gänzlich verändert zurückbleiben.

556. *Der Kern als Hauptsitz von Masse und Energie.* — Die Unbeeinflußbarkeit durch die Umgebung zeigt an, daß die ausgeschleuderten *α-Partikel und β-Elektronen aus dem Inneren der Atome* (vgl. 542) kommen. Es kommt der Kern (538) als Ursprung in Betracht, insofern dieser die Hauptmasse des Atoms enthält (540) und also Ursprung der abgegebenen α-Partikel sein kann. Auch die β-Elektronen mit ihren sehr großen Geschwindigkeiten dürften den Kern als Ursprung haben (Kerndynamiden, 542); denn äußere Elektronen, wie die der lichtelektrischen Wirkung und der Sekundärstrahlung, entweichen nur mit kleiner kinetischer Energie aus den Atomen (468, 493). Auch die Änderungen der Eigenschaften der Atome beim Zerfall zeigen nur das Atominnere als Ursprung der α- und β-Strahlung an (569), und die Untersuchungen über die Umwandlung der Elemente durch äußere Einflüsse zeigen ein äußerst kleines Volum im Atominneren, also wohl den *Kern, als Hauptsitz der großen Energie des Atoms* an (573).

Es ist sehr bemerkenswert, daß somit der Kern, der — mindestens bei den leichteren Atomen — durch die Stoßversuche als Hauptsitz der *Masse* des Atoms nachgewiesen ist (540), auch als Hauptsitz der *Energie* sich zeigt. Da Energie in allen umwandelbaren Formen, also auch die als Wärme nachweisbare Energie der radioaktiven Stoffe (554), eine ihrer Größe proportionale Masse besitzt (434), könnte hiernach die *Masse des Kerns* ganz und gar *Energiemasse* sein, und da die Masse des Kerns überwiegend Masse seiner Protonen ist (538), so ist damit — *wie beim Elektron* (485) — *auch beim Proton die Masse als Energiemasse* angezeigt. Besondere *Massen, die nicht Energie wären*, sind *in den Atomen* nicht merklich geworden; solche Massen gibt es dann aber überhaupt nicht.

557. *Zerfallsreihen.* — Die hiermit erkennbar gewordene Unbeständigkeit der Atome ist eine Eigenschaft vorzugsweise der *größten Atomgewichte*. Alle stark radioaktiven Elemente haben Atomgewichte über 206 (Ra 226, Th 232, Ur 238, vgl. auch Abb. 122). Nach Abgabe eines α-Partikels oder β-Elektrons ist das Atomgewicht noch immer hoch, und es erfolgt neuer Zerfall mit entsprechen-

der Strahlung. Dies wiederholt sich mehrmals, so daß eine ganze „Zerfallsreihe" von Elementen zustande kommt, die alle ihre besonderen Eigenschaften haben. Es sind das im allgemeinen neue, vorher nicht bekannt gewesene Elemente, teils aber auch Isotope schon bekannter Elemente, die meist nur durch ihre Strahlung merklich werden.

Die Feststellung der Zerfallsreihen, deren man mehrere kennt, machte wegen des zu allermeist nur spurenweisen Vorhandenseins der einzelnen Stoffe große Mühe. Jedoch der Gedanke, daß es sich tatsächlich um Atomumwandlungen handle, hat sich bei der Entwirrung der vielen beobachteten, zuerst unverständlich erscheinenden Tatsachen vollkommen bewährt, so daß jetzt schon viel wohlgeordnete, nach allen Seiten hin gut zusammenhängende Kenntnis der radioaktiven Vorgänge und Stoffe vorliegt. Diese Kenntnis ist zusammengedrängt enthalten in den Abb. 121 (560) und 122 (S. 253) und deren nachfolgenden Erläuterungen; einige Angaben, besonders Zahlenwerte betreffend, unterliegen dabei noch immer der fortlaufenden Verbesserung, was aber den Wahrheitswert der schon erläuterten Haupterrungenschaften nicht stört. Tab. 122 ist eine vergrößerte und mit Einzelheiten ausgestattete Darstellung des untersten Teiles der schon wiederholt benutzten allgemeinen Atomtabelle (vgl. M 23, E 192), die zum Anschluß beigedruckt ist (S. 252). Je ein Rechteck in Abb. 122 bedeutet eine Atomsorte. Dicht in Gruppen übereinanderstehende Atome sind isotop und sind in der allgemeinen Atomtabelle nur als ein einziges Element angegeben; es stehen z. B. in der ersten Spalte der Abb. 122 dreierlei „Emanationen" (Em), an deren Stelle in der allgemeinen Tabelle nur eine erscheint (Atomgewicht 220).

Wir zeigen im folgenden einige Beispiele von radioaktiven Vorgängen, um dabei auch die Art ihrer Verfolgung näher anzugeben (558—565), und wir beginnen mit der Zerfallsreihe des Radiums (558—563).

558. Radiumzerfall. — Frisch auskristallisiertes Radiumsalz gibt nur α-Strahlen aus, keine β-Strahlen. Die Strahlen machen die Luft leitend; aber die Luft bleibt auch nach Entfernung des Radiums noch auffallend lange leitend; sie ist selbst radioaktiv geworden. Es ist ein radioaktives Gas, das aus dem Radium sich entwickelt und in der Luft sich verbreitet; denn es kann mit der Luft fortgeführt, in Flüssigkeiten absorbiert und durch Kochen oder Luftdurchglucken wieder daraus entfernt, durch Kühlung verflüssigt und bei etwa —70°C fest gemacht werden und behält bei Allem seine Radioaktivität. Man nennt es die „Radium-Emanation" (RaEm) oder auch „Radon" (Rn). Es ist ein chemisch träges Gas, ähnlich den Edelgasen. In einigen mm^3, aus viel Ra gesammelt, erleuchtet es infolge seiner Strahlung das Glasgefäß zu dessen grüner Fluoreszenz. Elektrische Entladungen zeigen, daß es ein besonderes Emissionsspektrum hat; es ist ein besonderes Element. Sein Atomgewicht wäre unter der Annahme, daß jedes Radiumatom nur 1 α-Partikel abgibt, $226 - 4 = 222$, und dies hat sich durch Verfolgung des weiteren Geschehens, das in der Zerfallsreihe Abb. 121 (560) dargestellt ist, bestätigt. Mit diesem Atomgewicht ist die RaEm auch in Abb. 122 (S. 253) eingetragen und zwar, dem schon erwähnten chemischen Verhalten nach, in die erste Spalte, zu den Edelgasen (vgl. die allgemeine Atomtabelle).

559. Zerfallskonstante; Halbwertszeit. — Es zerfällt also das feste Element Ra in die zwei bei gewöhnlicher Temperatur gasförmigen Elemente He und RaEm. Dieser Zerfall ist sehr langsam; denn eine gewogene Radiummenge nimmt nicht leicht merklich ab. Man hat aber durch Zählung der von einer gewogenen Ra-Menge ausgesandten α-Partikel (550) auch die Zahl der in gemessener Zeit zerfallenen Radiumatome, und da man die Zahl der insgesamt vorhandenen Atome aus dem Gewicht und dem absoluten Atomgewicht (W 102) kennt, so weiß man auch, welcher Bruchteil vorhandener Atome in jeder Sekunde zerfällt. Dieser Bruchteil ergibt sich außerordentlich klein; er ist $1{\cdot}37 \cdot 10^{-11}$. Er ist eine Konstante des Radiums und wird die „Zerfallskonstante" genannt. Jedes radioaktive Element hat seine besondere Zerfallskonstante. Die Konstanz ist gesichert durch die beobachtete Konstanz der Strahlung, gemessen etwa durch Luftleitung (547), bei gegebener Stoffmenge.

Wenn demnach stets derselbe Bruchteil der vorhandenen Menge sekundlich im Zerfall begriffen ist, so nimmt die Menge nach geometrischer Reihe oder, was dasselbe ist, nach einer Exponentialfunktion der Zeit ab[1]). In derselben Weise nimmt auch die Strahlung und damit auch die erregte Luftleitfähigkeit ab, was auch „Abklingung" genannt wird. Man berechnet mit Kenntnis dieses Verlaufs auch leicht aus der Zerfallskonstante die Zeit, nach welcher eine gegebene Menge bis zur Hälfte zerfallen ist; sie wird als „Halbwertszeit" bezeichnet[2]) und gibt gute Anschauung von der Größe der Haltbarkeit jedes der verschiedenen radioaktiven Elemente und gleichzeitig aller ihrer Verbindungen. Für Radium ergibt sich mit der angegebenen Zerfallskonstante die Halbwertszeit zu rund 1600 Jahren. Dies bedeutet, daß von jeder beliebig gegebenen Radiummenge nach 1600 Jahren immer noch die Hälfte unzerfallen vorhanden ist. Zerfall der Gesamtmenge wird daher erst nach unendlich langer Zeit eingetreten sein.

Man sieht daraus, daß dem Ra-Atom — und ebenso auch jedem anderen radioaktiven Atom — nicht etwa eine begrenzbare Lebensdauer zugehört, so daß die Wahrscheinlichkeit seines Weiterbestehens mit zunehmendem Alter sinken würde; sondern die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung einer bestimmten Weiterdauer bleibt immer die gleiche, nur ist sie für die Atome verschiedener Elemente verschieden groß. Für ein Ra-Atom ist die Wahrscheinlichkeit einer fortgesetzten Lebensdauer von über 1600 Jahren immer gleich ½, d. h. unter einer sehr großen Zahl von Ra-Atomen (beliebigen Alters) wird es für die Hälfte zutreffen, daß sie länger als 1600 Jahre weiter bestehen, während die andere Hälfte kürzer bestehen bleibt.

Man darf hiernach denken, daß alle Atome sämtlicher Elemente fortdauernd wechselnde innere Zustände durchlaufen, von denen einer den Zerfall (oder eine bestimmte Zerfallsart) bedeutet. Die Halbwertszeit ist Maß für die Seltenheit der Erreichung dieses Zustandes. Bei genügend vielen Atomen desselben Elementes sind gleichzeitig alle verschiedenen möglichen Zustände vorhanden. Bei nichtradioaktiven Elementen ist der Zerfallszustand unendlich selten zu denken; ihre Halbwertszeit ist unendlich oder doch so groß, daß sie außerhalb des gegenwärtig Meßbaren liegt.

---

[1]) Vgl. den mathematisch gleichen Fall im Anhang M III (Bd. I) und im Anhang E VII (Strahlabsorption). So wie im letzteren Fall die Intensität I mit wachsender Schichtdicke x um stets den gleichen Bruchteil abnimmt, so hier die Atomzahl N mit der Zeit t. Daher ist hier, ebenso wie dort, $N = N_0 e^{-\lambda t}$. Dies ist die Gleichung für die exponentielle Abnahme der Atomzahl mit der Zeit.

[2]) Ist λ die Zerfallskonstante, so ist $(\log 2)/\lambda$ die Halbwertszeit ($N = N_0/2$ in der Gleichung der vorigen Anmerkung).

560. Aktiver Niederschlag. — Weitere Kenntnis der Radium-Zerfallsreihe ergab sich dadurch, daß die Emanation, frisch vom Radium abgetrennt und mit Luft gemischt beobachtet, nicht den bei einfachem Zerfall zu erwartenden exponentiellen Abfall (559) ihrer Aktivität — verfolgt durch die leicht meßbare Luftleitung (547) — zeigt, sondern ein verwickeltes Verhalten. Die Aktivität nimmt erst zu und später ab, mit allmählichem Verschwinden bis auf einen Rest, der auch nach vielen Tagen noch bleibt. Auch kommen zu den α-Strahlen der reinen, frisch vom Radium genommenen Emanation allmählich β-Strahlen hinzu.

Man findet außerdem, daß die Wände des Gefäßes von darin befindlicher Emanation selber aktiv werden und die Aktivität auch eine Zeitlang behalten, nachdem die Emanation aus dem Gefäße getrieben und durch reine Luft ersetzt ist. Man nannte das die „induzierte Aktivität" des Gefäßes. Besser ist die Bezeichnung „aktiver Niederschlag" der Emanation; denn es zeigt sich, daß ein unsichtbarer, dünner Belag der Gefäßwände der Träger dieser Aktivität ist. Lösungsmittel entfernen den Belag und damit auch die Aktivität. Der Belag

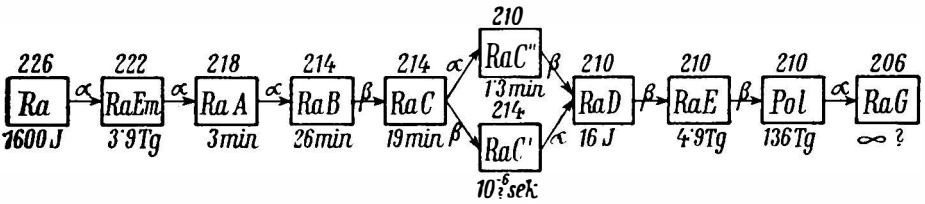


Abb. 121. Zerfallsreihe des Radiums mit Angabe der α- und β-Strahlung. Über dem Elementzeichen das Atomgewicht, darunter die Halbwertszeit[1]).

setzt sich aus der Luft ab, in welcher die Emanation ihn in schwebender Feinzerteilung aus sich entwickelt hat. Dieser aktive Niederschlag hat eine starke aber — abgesehen von einem bleibenden Rest — nur kurzdauernde Aktivität; er ist — — schwebend und an den Wänden — die Ursache der anfänglichen Zunahme der Aktivität der Emanation.

Eingehende Untersuchung zeigte, daß der aktive Niederschlag von nicht einfacher Beschaffenheit ist. Er gibt α- und β-Strahlen gemischt, klingt nicht rein exponentiell ab, und er läßt sich auch durch Lösungsmittel, sowie durch Erhitzen in verschiedene Bestandteile trennen. Die zuerst gefundenen Bestandteile haben die Namen RaA, B und C erhalten (vgl. Abb. 121); ihre Halbwertszeiten sind rund 3 Min., 26 Min. und 19 Min. RaA ist im chemischen Verhalten dem Tellur ähnlich, RaB verhält sich ganz wie Blei, RaC wie Wismut. Es sind das wieder drei neue Atomsorten. Als neue Elemente sind sie nicht zu bezeichnen; denn RaA ist isotop mit dem später noch zu erwähnenden Polonium (Po), RaB mit Pb, RaC mit Bi, von denen sie chemisch nicht zu trennen sind; sie finden sich dementsprechend in Abb. 122 (S. 253) bei den betreffenden Isotopengruppen, deren jede in der allgemeinen Atomtabelle nur durch den Hauptvertreter (Po, Pb, Bi) angegeben ist.

Es ist sehr bemerkenswert, daß diese Ergebnisse nur durch chemische und auch elektrolytische Versuche an den unsichtbar kleinen Stoffmengen des

[1]) Die Kenntnis der Halbwertszeiten unterliegt noch fortdauernder Verbesserung.

aktiven Niederschlags gewonnen werden konnten, wobei der Verbleib der betreffenden Stoffe — ob in Lösung, in Fällung oder sonstiger Abscheidung, ob verflüchtigt oder hitzebeständig — immer nur durch Messungen der Luftleitfähigkeit ermittelt werden konnte, die sie durch ihre Strahlung bewirken[1]). Die Atomgewichte sind, wieder unter der nachher durchweg bestätigten Annahme nur einfacher Strahlung jedes Atoms: bei RaA um 4 weniger als bei der Emanation, die α strahlt, d. i. 222 — 4 = 218; bei RaB ebenso 218 — 4 = 214, weil RaA auch α strahlt; bei RaC unverändert 214, weil RaB β strahlt, wobei Gewichtsverlust für unsere abgerundeten Atomgewichtsangaben nicht in Betracht kommt (vgl. 555). Alles dies findet man übersichtlich in leicht verständlicher Weise in Abb. 121 festgehalten.

Die Halbwertszeit der Emanation für sich ergibt sich danach zu rund 3·9 Tagen, und es entstehen so aus der gasförmigen Emanation die 3 festen, zum Teil sogar schwer flüchtigen Produkte RaA, B und C. Der Rest von Aktivität, welcher nach dem Abklingen der Emanation samt deren 3 kurzlebigen Produkten A, B, C übrig bleibt, gehört dem aus dem RaC entstehenden RaD zu, das mit einer Halbwertszeit von 16 Jahren nur langsam weiter zerfällt.

561. Verzweigung der Zerfallsreihe. — Die Eigentümlichkeit in zweierlei Weisen zu zerfallen wurde am RaC gefunden. Es gibt α- und β-Strahlen aus, letztere aber sehr viel häufiger als erstere (im Verhältnis 997:3); die Vermutung, daß jeder der beiden Strahlungen ein besonderer Zerfallsvorgang zugehöre, hat sich bestätigt. Die Untersuchung ist hier schwierig wegen der Kürze der Halbwertszeiten der beiden Produkte C′ und C″ (s. Abb. 121). Sicher ist, daß aus RaC in sehr kurzer Zeit Radium D wird, ein beständigeres Produkt, das bei der Halbwertszeit von 16 Jahren sogar in sichtbaren Mengen gewonnen werden kann. Es findet sich als Rest in Röhren, die längere Zeit Ra-Emanation enthalten haben. Es ist isotop mit Blei.

562. Übergang in Blei. — RaD geht auf dem in Abb. 121 angegebenen Wege über RaE und RaF — auch Polonium genannt — in RaG über, welches chemisch von Blei nicht unterscheidbar, demnach ein Bleiisotop ist. Schon RaD war Bleiisotop, war aber noch aktiv; RaG ist inaktiv, wie gewöhnliches Blei. Die Atomgewichte von RaD bis mit Polonium bleiben 210, weil nur β-Strahlen abgegeben werden; Polonium gibt α-Strahlen ab, wonach für RaG das Atomgewicht 206 anzunehmen ist, und dies stimmt auch soweit mit dem an gewöhnlichem Blei festgestellten Atomgewicht 207·2 als zu erwarten ist, insofern noch ein anderes inaktives Bleiisotop, mit über 207·2 liegenden Atomgewicht, bekannt ist (ThD, vgl. Abb. 122), das mit RaG (und mindestens noch dem weiteren inaktiven Bleiisotop AcD) gemischt das gewöhnliche Blei bilden dürfte.

Somit hat die nach den Strahlungen erwartete Reihe der Atomgewichte von Ra bis RaG, wie in der Abb. 121 angegeben, guten Anschluß an die wohlgesicherten Atomgewichtsbestimmungen des Ra einerseits und des Pb andererseits gefunden. Dazu kommt noch, daß Blei, welches Mineralen entnommen war, in denen es, nach Art und Vorkommen derselben, nur aus Radium (bzw. Uran) entstanden anzunehmen ist (vgl. 567), in der Tat das Atomgewicht 206 ergab. Außerdem haben auch Kanalstrahluntersuchungen (518) Bleiisotope mit den Atomgewichten 206, 207 und 208 angezeigt.

563. Die gesamte Radium-Zerfallsreihe (Abb. 121), von Ra bis RaG ist auch in Abb. 122 (S. 253) eingetragen. Hier findet sich, wie in der allge-

[1]) Diese Methode der chemischen Analyse übertrifft an Empfindlichkeit noch die Spektralanalyse (O 78).

meinen Atomtabelle, jedes Element in der Höhe seines Atomgewichts und in der Spalte seiner chemischen Eigenschaften; auch die Verzweigung (561) ist einbegriffen. Die (stark unterstrichenen) Elementzeichen mit den (teils vielleicht genauer angegebenen) Halbwertszeiten sind durch (stark gezeichnete) Linien verbunden. Auf die so entstehende, im Zickzack aufsteigende Anordnung kommen wir noch zurück (568 u. f.).

564. Zerfallsreihe des Thor. — Auch für das andere, schon früh gefundene radioaktive Element, Thor (548), ist eine gut gesicherte Zerfallsreihe ergründet worden. Sie hat viel Ähnlichkeit mit der Radium-Zerfallsreihe und ist in Abb. 122 ebenfalls eingetragen (vgl. 563); Elementzeichen und Verbindungslinien sind durch Punktierung gekennzeichnet. Thor selbst, mit dem Atomgewicht 232·1 ist α-strahlend und außerordentlich langlebig; seine Halbwertszeit beträgt rund $2 \cdot 10^{10}$ Jahre. Die Ermittelung erfolgte sowohl durch Zählung der α-Partikel wie beim Ra (559), als auch durch Messung der Luftleitung im Vergleich zu der von Radium erregten.

Bemerkenswert ist das ziemlich langlebige erste Zerfallsprodukt des Thor, das $Mesothor_1$, das in Thormineralen angehäuft sich findet und aus diesen wie Ba und Ra, mit dem es isotop ist, abgeschieden werden kann. Es ist β-Strahler und liefert Produkte, die in ihm sich anhäufen und die ebenfalls β-Strahlen geben, begleitet von besonders kurzwelligen γ-Strahlen; Mesothor-Präparate werden daher vorteilhaft als γ-Strahlquellen benutzt.

Auch ein gasförmiges Produkt findet sich in der Thor-Reihe, die Thor-Emanation, auch Thoron genannt; sie ist isotop mit der Ra-Emanation. Das Endprodukt ist wieder Blei, wie bei Ra (562); es wird wieder über eine Verzweigung der Zerfallsreihe erreicht und ist ThD benannt; das Atomgewicht ist mit der Waage bestimmt, 207·8, und sichert gut die Atomgewichte der ganzen Reihe.

565. Uranzerfall. — Die sehr umfangreiche Zerfallsreihe dieses früheſt radioaktiv gefundenen Elements, Uran, ist noch in fortdauernder Untersuchung begriffen; eine wohl noch verbesserungsbedürftige Zusammenstellung ist in Abb. 122 (S. 253) mit eingetragen (vgl. 563). Sicher ist, daß Uran sehr langlebig ist mit einer Halbwertszeit, die auch die des Ra noch um etwa das Millionenfache übertrifft, außerdem besonders, daß Radium selber ein Zerfallsprodukt des Urans ist, so daß eine ununterbrochene Reihe radioaktiver Elemente vom Ur zu Ra und von diesem auf dem bereits erläuterten Wege bis zum Pb führt. Diese ganze Reihe ist in der Abb. 122 durch starke Linien gekennzeichnet.

Zwischen Ur und Ra treten zwei ebenfalls sehr langlebige Produkte auf; Uran II und Jonium (Jo). Das UrII ist dem ursprünglichen Uran, das zum Unterschied mit UrI bezeichnet wird, isotop und ist dem letzteren in gewöhnlichem Uran stets beigemischt, weil es aus ihm entsteht und chemisch nicht davon getrennt werden kann.

Die Uranreihe verzweigt sich (in Abb. 122 beim UrII, wohl aber schon beim UrX_1 [1]); der eine Zweig gibt über das Jonium die Ra-Reihe, der andere die besondere Aktinium-Reihe. Der Zerfall nach Aktinium hin ist aber fast 100mal seltener als der nach Radium hin. Die Aktinium-Reihe ist in Abb. 122 durch Strichelung gekennzeichnet; sie führt über das langlebige Protaktinium zum Aktinium (Ac), Radioaktinium und zu einer Aktinium-Emanation, die wie die beiden anderen Emanationen zu den Edelgasen gehört, und zuletzt, nach noch besonderer Verzweigung (beim AcC) zum AcD, das wieder Blei ist.

566. Radioaktives Gleichgewicht. — Wenn ein radioaktiver Stoff in festem Zustande längere Zeit aufbewahrt wird, sammeln sich in ihm alle seine Zerfallsprodukte der Reihe nach samt dem Blei. Selbst die gasförmige Emanation entweicht nur in geringem Maße an der Oberfläche; im Inneren bleibt sie, wie auch andere Gase in so geringen Mengen, absorbiert[2]). Von diesen Pro-

[1]) Es stehen dann zwischen UrX_1 und UrII zweierlei Elemente, nämlich außer dem Brevium von Abb. 122 (das den Namen UrX_2 erhalten hat) noch ein sehr selten auftretendes UrZ mit 0·7 St. Halbwertszeit.

[2]) Gasdicht eingeschlossene, feuchte Radiumpräparate sammeln leicht inneren Überdruck, der aber nicht von Emanationsentwickelung, sondern von Knallgasentwickelung kommt, da α-Strahlen Wasser zersetzen.

dukten kann aber nur das Blei in voller, entstandener Menge sich sammeln; denn die übrigen Produkte beginnen sofort bei Entstehung mit ihrem Zerfall, und sie sammeln sich daher nur bis zu bestimmten Mengen, die dadurch bedingt sind, daß dann ebensoviel von ihnen zerfällt als gleichzeitig entsteht. Man sagt dann: sie sind in „radioaktivem Gleichgewicht" mit ihrem Ursprungsstoff.

Da die zeitliche Abnahme der Atomzahl für jeden einzelnen Stoff nach seiner Zerfallskonstante bekannt ist (559), ebenso aber auch die gleichzeitige Zunahme durch Zerfall des Vorgängers in der Zerfallsreihe nach dessen Zerfallskonstante, so ist es klar, daß die Mengen aller im Gemisch vorhandenen Stoffe zu jeder Zeit berechenbar sind, wenn ihre Zerfallskonstanten und die Anfangsmengen bekannt sind; es kommt nur die einfache, in der ersten Note zu 559 angegebene Exponentialgleichung mit einiger Umrechnung zur Anwendung.

Besonders einfach und auch wichtig ist der Fall, daß ein sehr langsam zerfallender Stoff, wie Uran (UrI + UrII, vgl. 565), Zerfallsprodukte in sich anhäuft, die alle so viel schneller als er zerfallen, daß seine eigene Menge als immer gleich der gegenwärtigen Menge gewesen betrachtet werden kann[1]). Es ergibt sich dann sehr einfach, daß bei eingetretenem Gleichgewicht alle gleichzeitig vorhandenen Atomzahlen der einzelnen Stoffe proportional deren Halbwertszeiten sein und bleiben müssen, so daß sie in dieser Proportion alle miteinander zeitlich absinken, während nur das stabile Endprodukt (Pb) dauernd sich anhäuft. So findet man z. B., daß im Uranpecherz, das alt genug ist um Gleichgewichtszustand zu haben, neben seinem Uran, auf je 1 Tonne (= 1000 kgr = 10^9 mgr) desselben, folgende Mengen seiner Zerfallsprodukte enthalten sein müssen, wenn nichts entwichen ist: 340 mgr Radium, 0·002 mgr Emanation, 10^{-6} mgr RaA, 2·3 mgr RaD, 0·07 mgr Polonium und so viel Blei, als dem Alter des Minerals seit seiner Abscheidung (aus dem ursprünglich wohl feurigflüssigen Zustande) entspricht.

Ob ursprünglich neben dem Uran schon die anderen Stoffe, z. B. Ra, etwa vorhanden gewesen wären, ist für die gegenwärtigen Gleichgewichtsmengen ohne Belang, da diese Stoffe längst schon so gut wie vollständig zerfallen wären; nur der Bleigehalt würde dann größer sein müssen als dem Urangehalt und dem Alter entspräche. Ebenso würde er größer sein müssen, wenn ursprünglich schon Blei neben dem Uran vorhanden gewesen wäre.

Die quantitativen Analysen von Uranpecherz und anderen als ungestört gelagert anzunehmenden Uranmineralen ergaben in der Tat das Verhältnis vom Uran- zum Radium-Gehalt sehr nahe wie oben angegeben, was eine Bestätigung der aus den α-Partikelzählungen gefundenen Halbwertszeiten von UrI und Ra bedeutet.

567. Alter der Erdrinde. — Nach dem Vorhergehenden ist es klar, daß die Ermittelung des Bleigehaltes von harten, unverwitterten Uranerzen in einfacher Weise die Zeit seit Erstarren dieser Erze berechnen läßt, falls das Blei nur dem Uran entstammt, andernfalls die Zeit allerdings zu groß gefunden

[1]) Da in Wirklichkeit zu den früheren Zeiten mehr vom Ursprungsstoff da war, werden auch von den Zerfallsprodukten stets größere Mengen, als nach obiger Annahme berechnet, vorhanden sein; doch ist der Unterschied immer sehr klein, wenn die Halbwertszeit des Ursprungsstoffes auch nur das 100fache der seiner Produkte ist, was oft vorkommt.

würde. Die so ermittelte Zeit ist daher ein oberer Grenzwert für das Alter der festgewordenen Erdrinde. Dieses Alter ergibt sich so zu rund 1300 Millionen Jahren, oder weniger.

Einen unteren Grenzwert für das Alter der festen Erdrinde erhält man aus dem Heliumgehalt von Uranmineralen. Uran- und thorhaltige Minerale entwickeln beim Erhitzen Heliumgas, das sie eingeschlossen enthielten. Es ist anzunehmen, daß dieser Heliumgehalt das Ergebnis der im Mineral absorbierten α-Strahlen seiner eigenen, radioaktiv zerfallenden Atome ist. 1 Atom UrI gibt, seiner Zerfallsreihe entsprechend, 8 α-Partikel ab, bis es Pb wird, was nach Aufnahme von je 2 Elektronen aus der Umgebung 8 He-Atome liefert. Ist das Mineral gas- und wasserdicht, so kann der größte Teil des Heliums in ihm aufgespeichert geblieben sein, gerechnet von der Zeit der Erstarrung des Minerals; an der Oberfläche müssen allerdings α-Strahlen und He entweichen sein. Die Berechnung der Zeit seit Erstarren und Erkalten des Minerals aus dem Heliumgehalt wird daher wohl immer nur untere Grenzwerte ergeben. In dieser Weise ergaben die Untersuchungen uranhaltiger Minerale ein Alter von mindestens 500 Millionen Jahren für die feste Erdrinde.

Im ganzen lassen demnach die radioaktiven Untersuchungen rund 1000 Millionen Jahre für die Zeit annehmen, die seit Erstarrung und dann bald nachfolgender Temperaturermäßigung (W 146) der Erdoberfläche verflossen ist und die somit zur Entwickelung all der Lebewesen verfügbar war, die heute die Erde bewohnen. Soweit ein Urteil möglich ist, konnte diese Zeit für diese Entwickelung auch genügt haben.

Änderungen der Eigenschaften der Elemente beim Zerfall.

568. Darstellung des Verhaltens durch die Atomtabelle. — Trägt man sämtliche beim Studium der Zerfallsreihen bekannt gewordenen radioaktiven Atome nach ihren Gewichten und nach ihren, trotz geringer Mengen zumeist gut ermittelten chemischen Eigenschaften in die allgemeine Atomtabelle ein, wie es in Abb. 122 (S. 253) geschehen ist, so bemerkt man Zusammenhänge zwischen der Art der radioaktiven Umwandlung der Atome und dem Wechsel ihrer chemischen Eigenschaften.

Diese Abbildung 122 ist vergrößerte Darstellung des unteren Endes der allgemeinen Atomtabelle S. 252 (vgl. 557, 563 u. f.). Das Atomgewicht bestimmt überall die Höhenlage, die chemischen Eigenschaften bestimmen die Spalte, in welche das Atom einzutragen ist[1]). Wo die chemischen Eigenschaften wegen zu schnellen Zerfalles nicht gut ermittelbar waren, ergab sich doch widerspruchsfrei ein Platz für das Atom, der dem sogleich zu erörternden einheitlichen Verhalten aller radioaktiven Atome entspricht. Die Verbindungslinien der Atomzeichen in der Abb. 122 stellen den Zusammenhang der Zerfallsreihen dar (vgl. 563), die von unten nach oben zu verfolgen sind. Jede mit Entweichen eines β-Strahles verbundene Umwandlung muß horizontalen Lauf der Verbindungslinie geben, weil sie das Atomgewicht rund ungeändert läßt. Jede α-Strahlumwandlung muß eine um 4 Atomgewichtseinheiten aufsteigende

[1]) Man vergleiche, die chemischen Eigenschaften und besonders die am Kopfe der beiden Tabellen eingetragenen Valenzen betreffend, 192 und 570.

Verbindungslinie geben, weil sie diese Verminderung des Atomgewichts hervorbringt. Man erkennt somit aus dem Lauf der Verbindungslinien in der Abbildung, ob horizontal oder aufsteigend, überall die Art der Umwandlung.

Beachtet man nun, wie die Atome bei diesen zweierlei Umwandlungen aus einer Spalte der Tabelle in eine andere gelangen, was dem Wechsel ihrer Eigenschaften entspricht, so zeigt sich ganz allgemein, bei allen Zerfallsreihen, das Folgende: Entweichen eines β-Elektrons verschiebt stets das Atom um eine Spalte nach rechts, erhöht also seine Valenzenzahl um 1. Entweichen eines α-Partikels aber ergibt eine Verschiebung um 2 Spalten nach links, erniedrigt also die Valenzenzahl um 2.

569. Veränderungen des Atominneren beim Zerfall. — Dieser Wechsel von Valenzen und sonstigen Eigenschaften der Atome beim Zerfall ist jedenfalls bedeutungsvoll. Nach bisheriger Kenntnis vom Atominneren kann er etwa folgendermaßen gedeutet werden.

Wenn ein β-Elektron aus dem Atom entweicht, so bleibt das Atom mit positiver Ladung zurück; es kann zwar das fehlende Elektron aus der Umgebung wieder aufnehmen, aber nicht wieder ins Innere des Atoms, von wo das Entweichen stattgefunden hat (556) und wohin es wohl nur mit besonderem Energieaufwand gebracht werden könnte, sondern nur ins Äußere, als Valenzelektron. Daher also hat das Atom dann 1 Valenzelektron und damit eine Valenz mehr. Es ist nach der β-Strahlung ein Atom entstanden, das zwar ebensoviel Dynamiden hat wie das Ursprungsatom (daher auch rund gleiches Gewicht), aber es ist aus einer inneren Dynamide — Kerndynamide — eine Valenzdynamide geworden (542).

Wenn ein α-Partikel aus dem Kern entweicht, so fehlen dem Atom 2 Kerndynamiden und 2 Protonen, die Bestandteile des α-Partikels (550). Das Atom hat dann zwei Elektronen im Überschuß, und diese entweichen vom Äußeren des Atoms mit den geringen, als besondere Strahlung nicht merklichen Geschwindigkeiten, wie auch sonst die äußeren Elektronen (468, 493); diese Elektronen fehlen dann unter den Valenzelektronen, und daher also hat das Atom dann 2 Valenzen weniger.

570. Periodischer Wechsel der Valenzen mit steigender Ordnungszahl. — Es ist besonders bemerkenswert, daß die Atomtabelle an ihren beiden Rändern auch bei diesen Umwandlungen der Elemente in sich geschlossen erscheint, wie es den fortlaufenden Ordnungszahlen der Elemente entspricht; die Tabelle kann als vom Mantel eines vertikalen Zylinders abgewickelt betrachtet werden, auf welchem die Elemente den Ordnungszahlen nach in einer Schraubenlinie verzeichnet sind. Der rechte Rand der Tabelle findet überall Anschluß an den linken Rand. Man sieht dies auch an den Verbindungslinien, welche von den 3 Emanationen aus nach links laufen und ihre Fortsetzung am rechten Rande der Tabelle finden.

Auch dies muß bedeutungsvoll sein. Man kann — sofern Valenzen und Valenzelektronen überhaupt eine einfache Bedeutung haben (192) — den Atomen der verschiedenen Spalten der Atomtabelle von links nach rechts hin fortschreitend wachsende Valenzenzahlen und entsprechende Valenzelektronenzahlen zuschreiben, von Null in der ersten Spalte angefangen bis 8 in der letzten

Atomtabelle; natürliches System der Elemente.

Valenz / Gewicht	0	+1, 2, 3	+2, 1	+−3, 1	+−4, 2	+−3, 5	−+2,3, 4,6	−+1,3, 5,7	+ 1, 2, 3, 4	8	−
0–	2 He	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F		1 H	
10–	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl			
20–	18 Ar	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni
30–		29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br			
40–	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Ms	44 Ru	45 Rh	46 Pd
50–		47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 J			
60–	54 X	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61			
70–		62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er			
80–		69 Tu	70 Yb	71 Cp	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt
90–		79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85			
200–											
210–											
220–	86 Em	87	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 Ur				
230–											
240–											

Siehe Abb. 122

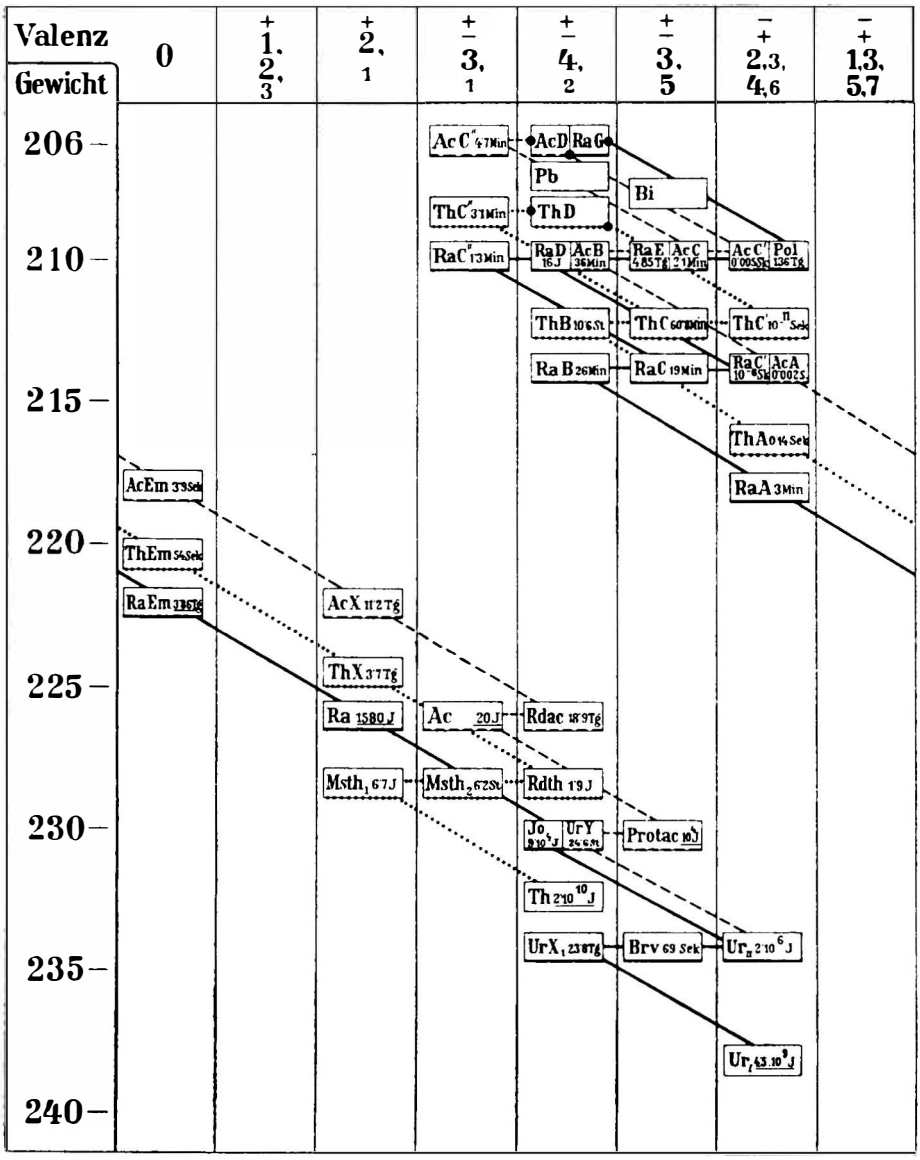


Abb. 122. Radioaktive Umwandlungen[1]).
(Unteres Ende der Atomtabelle in vergrößertem Maßstabe.)

Zu 557—571.

[1]) Zum Uranzerfall vgl. 565, zu den Halbwertszeiten die Note zu Abb. 121.

(dreigeteilten), wie wir es soeben schon getan haben und wie es am Kopfe der Tabelle (mit den zugehörigen Verwickeltheiten) angegeben ist (siehe 192). Dann würde es Eigentümlichkeit der Atome sein, daß sie mit wachsender Ordnungszahl (521) — d. i. auch wachsender Kernladung (538) — wachsende Zahlen von Valenzelektronen in ihrem Äußeren haben, daß aber die Zahl über 8 nicht steigen kann, sondern daß nach einem Element mit 8 Valenzelektronen stets wieder eines ohne alle Valenzelektronen folgt, etwa indem diese Außenelektronen dann mehr ins Innere sich zurückziehen, wie es Mitteldynamiden entspricht (542), worauf dann beim nächsten Element wieder 1 Valenzelektron ganz außen Platz fände, wie es das Atombild des Lithiums (Abb. 120c, 541) andeutet.

571. Radioaktive Isotope. — Es sei in der Abb. 122 noch auf die Gruppen dicht übereinander stehender Atomarten hingewiesen, die wir schon bei Betrachtung der Zerfallsreihen in Beispielen als Isotope (518) bezeichnet haben (560—565).

In der 5. Spalte unten findet sich z. B. die Gruppe der 6 Atomarten Radioaktinium, Radiothor, Ionium, UranY, Thor, UranX_1, von denen das dritte und vierte wegen rund gleichen Atomgewichts zusammengeschoben dargestellt wurden. Je eine solche Isotopengruppe ist in der allgemeinen Atomtabelle nur durch einen, und zwar stets den langlebigsten Vertreter dargestellt, so die eben betrachtete Gruppe durch das Thor. Der ganzen Gruppe kommt auch nur einerlei Ordnungszahl zu (521) — 90 bei der Thorgruppe —, wie auch die nichtradioaktiven Isotopen je eine gemeinsame Ordnungszahl haben (543).

Über die Blei-Gruppe (5. Spalte oben in Abb. 122) wurde bereits Mehreres bemerkt (562—565); sie enthält 7 Isotope, wovon drei nichtaktive Endprodukte sind (AcD, RaG, ThD), die zusammen — soweit man weiß — das gewöhnliche Blei ausmachen (562).

Bei der Wismut-Gruppe (6. Spalte oben) ist es bemerkenswert, daß außer den 4 aktiven Isotopen hier das gewöhnliche, inaktive Wismut ohne Zusammenhang mit Zerfallsreihen, als deren Endprodukt es erschiene, zu verzeichnen ist — ein Beispiel dafür, daß hier vieles noch unbekannt ist.

Umwandlung von Elementen durch äußeren Einfluß.

572. Es hat sich ein weiterer Weg zur Kenntnis des Atominneren eröffnet im Studium der Einwirkung energiereicher Strahlen auf Atome, wobei die Atome Umbildungen erfahren, die der Umwandlung eines Elements in ein anderes entsprechen. Die Umwandlung erfolgt hier nicht selbsttätig, wie bei den schweren, radioaktiven Atomen, sondern durch äußere Beeinflussung bekannter Art, und sie betrifft besonders auch die leichtesten Atome. Oft tritt die vollständige Umwandlung verspätet, nach Aufhören der äußeren Beeinflussung ein, verbunden mit Strahlaussendungen („künstliche Radioaktivität").

Es sind das Änderungen von Atomen, die nach Will für erfolgen, die aber bisher nur bei einem verschwindend kleinen Bruchteil der bearbeiteten Atome gelingen.

Wir bringen hier nur die wohl vollkommen gesicherten Anfänge dieser neuen Kenntnisentwickelung.

573. Befreiung von Protonen durch α-Strahlen. — Es zeigte sich bei der Untersuchung der Einwirkung von α-Strahlen auf Atome (537 u. f.), daß — in seltenen Fällen — neuartige Strahlen aus der von den α-Strahlen getroffenen Materie kommen, auffallend durch die großen Strecken, längs welchen sie die Luft durchdringen können. Die Verfolgung dieser Strahlen gelang sowohl am Phosphoreszenzschirm als auch mittels der Nebelmethode (516), was die Untersuchung der Natur der Strahlen im elektrischen und magnetischen Felde (vgl. 453 u. f.) ermöglichte. Es ergab sich dabei ein Verhältnis von Ladung zur Masse wie es Protonen zugehört (533), und die Geschwindigkeiten zeigten sich so groß, daß die großen Luftwege verständlich wurden. Damit waren die als positive Teile der Dynamiden aller Atome schon erschlossenen Protonen (533) zum erstenmal im freien Zustand in Gestalt von Strahlen beobachtet und als Bestandteile der Atome unmittelbar nachgewiesen, und man erfuhr auch, daß schnelle Protonen ebenso Atome durchqueren wie die Kathodenstrahlen und die α-Strahlen.

Außer Protonen können auch γ-Strahlen aus den von α-Strahlen getroffenen Atomen entweichen, was besonders reichlich bei Be der Fall ist. Al läßt außer Protonen auch Neutronen (542a) und Positronen (533) entweichen.

Daß Wasserstoff und Wasserstoffverbindungen Protonen abgeben, war zu erwarten, weil das α-Partikel aus allen Atomen Elektronen abtrennt (vgl. 516) und weil ein H-Atom bei abgetrenntem Elektron nach der bereits aus der Ganzzahligkeit der Atomgewichte erschlossenen Kenntnis (532 u. f.) identisch mit dem Proton ist. Die große Geschwindigkeit, durch welche allein das befreite Proton sich besonders bemerkbar machte, erhält dasselbe aber nur in sehr seltenen Fällen; es müssen sehr viele H-Atome von α-Partikeln getroffen werden bis ein weitreichendes Proton erscheint, und dies gilt auch für die anderen untersuchten Atome. Diese Seltenheit läßt annehmen, daß das Proton nur dann mit großer Geschwindigkeit das Atom verläßt, wenn es nahe zentral vom α-Partikel getroffen wird, was bei der Kleinheit sowohl des α-Partikels als der Kerne der verschiedenen Atome (539) nur selten stattfinden kann (vgl. 538). Dem entspricht es auch, daß die schnellbewegten Protonen aus H-Atomen zumeist in Richtung der auftreffenden α-Strahlen entweichen; ihre große Geschwindigkeit entspricht, nach dem Massenverhältnis 4:1 zwischen α-Partikel und Proton, etwa dem, was für zentralen elastischen Stoß (vgl. M 276 u. f.) zu erwarten wäre.

Das wesentlich Neue zeigte sich zuerst bei Stickstoff und Stickstoffverbindungen (1919). Hier entweichen unter dem Einfluß schneller α-Strahlen ebenfalls Protonen, aber dieselben haben weit größere Geschwindigkeiten, als sie aus der Energie je eines der angewandten α-Partikel haben könnten; sie entweichen somit mit Energien, die aus den Stickstoffatomen stammen. Dem entspricht es auch, daß hier das Entweichen nicht in Richtung des α-Strahls, sondern allseitig erfolgt. Man kann danach sagen, daß α-Partikel, auf Kerne der leichten Atome treffend, dieselben radioaktiv sich verhalten lassen, so wie es die schwersten Atome von selber sind. Es entweicht aber nur bei etwa jeder 10^{10}-ten Durchquerung eines Stickstoffatoms durch ein schnelles α-Partikel 1 solches schnelles Proton. Diese große Seltenheit des Ereignisses, ebenso wie die Energiezugabe aus dem Atom, zeigt wieder an, daß der Kern des Stickstoffatoms ge-

troffen werden muß, was auch wieder mit dem Sitz der Protonen des Atoms im Kern und mit großem Energieinhalt desselben übereinstimmt (vgl. 538, 540, 556).

Bei allen Atomen außer Wasserstoff bedeutet das Entweichen eines Protons eine Veränderung des Kerns und damit auch eine wesentliche Veränderung des Atoms. Das Atomgewicht müßte um 1 abnehmen, wenn ein Proton entweicht; soweit bisher untersucht, bleibt aber das α-Partikel, das den Kern so nahe zentral getroffen hat, in demselben festgehalten, so daß im ganzen eine Zunahme des Gewichts des Stickstoffatoms um 3 stattfindet, was ein Atom mit dem Gewicht 17 ergibt, das man als Sauerstoffisotop ansehen kann (518, 543).

Ähnliches ist auch schon bei vielen anderen Elementen, auch unter Wirkung der anderen Strahlungen, beobachtet (575), wodurch man zu (vermutungsweiser) Aufzählung vieler neuartiger Isotopen der bekannten Elemente kam. Die Schwierigkeit der Verfolgung der Atomumwandlungen liegt in den nur kleinen betroffenen Atomzahlen.

574. Befreiung von Protonen durch Kathodenstrahlen. — Auch Elektronen können bei genügender Geschwindigkeit Protonen befreien. Selbstverständlich ist dies beim Wasserstoffatom, wenn sein Elektron als Sekundärstrahl entweicht (493), womit das freie Proton übrig bleibt. Aber auch Lithiumatome geben unter der Wirkung von Kathodenstrahlen Protonen ab. Dieselben werden als Protonenstrahl aber erst dann merkbar, wenn ein sie beschleunigendes Feld im Vakuum vorhanden ist, das gleichzeitig die wirksamen Elektronen heranziehen kann.

Es ist nach solchen Erfahrungen zu erwarten, daß freie Protonen häufig vorkommen, wo genügend schnell bewegte Elektronen Materie durchqueren; sie vereinigen sich aber wohl schnell mit den Elektronen zu Wasserstoffatomen. Eine Wasserstoff-Entladungsröhre in Tätigkeit enthält stets viele freie Protonen (vgl. 533); bringt man ein geeignetes elektrisches Feld an, so kann man diese Protonen beliebig beschleunigen und intensive Protonenstrahlen erhalten. Sie sind dasselbe wie Wasserstoff-Kanalstrahlen (517).

575. Protonenstrahlen bieten in ihren Wirkungen auf Materie, deren Atome sie durchqueren (573), ein wichtiges Untersuchungsmittel zu weiterer Erforschung des Inneren von Atomen[1]); sie geben Atomumwandlungen. Es kommen unter ihrem Einfluß aus leichten Atomen, wie Li, α-Partikel, so daß diese Partikel — He-Kerne, Gruppierung von 2 Kerndynamiden und 2 Protonen — nicht nur in den Kernen der schweren, radioaktiven Atome, sondern auch sonst als Gruppen besonderen Zusammenhalts erkennbar werden. Die Abgabe dieser Gruppen erfolgt auch aus den leichten Atomen, wie Li, mit Energieaufwand aus deren Innerem (vgl. 573).

Es scheint dabei der Kern eines Li-Atoms das Proton aufzunehmen — was bei der beiderseitig gleichnamigen Ladung und der nicht sehr großen Protonenmasse besonders bemerkenswert ist —, und damit explosionsartig in 2 He-Kerne zu zerfahren. Ähnlich scheinen aus einem Bor-Kern mit dem Proton 3 He-Kerne zu werden, soweit Nebelspurbeobachtungen (516) zeigen.

---

[1]) Auch positive Strahlen des isotopen Wasserstoffs (518), mit der Masse 2 (darin gleich halben α-Partikeln) werden benutzt, Deuteronenstrahlen genannt.

575a. Auch Neutronenstrahlen (542a) sind wichtige Atomkern-Untersuchungsmittel geworden.

Langsame Neutronen lassen bei ihrer Absorption γ-Strahlen aus Atomen entweichen, wobei anzunehmen ist, daß sie in die Kerne der absorbierenden Atome aufgenommen werden, Isotope mit um 1 erhöhtem Atomgewicht bildend, so z. B. bei Cd, J.

Schnellere Neutronen spalten Urankerne. Diese Spaltung kann in sehr verschiedener Weise erfolgen, was an dem Auftreten von vielerlei Atomsorten geringerer Ordnungszahl nachgewiesen ist (z. B. Kr, Sr, Ag). Diese Atome sind radioaktive (β-Strahlen aussendende) Isotope der bekannten stabilen Elemente. Sie können durch Beobachtung ihrer Radioaktivität einzeln aufgesucht und verfolgt werden, indem man sie mit einem nach der Neutronenbestrahlung zugesetzten Überschuß des betreffenden inaktiven Elementes (z. B. Sr) chemisch von dem bestrahlten Ur abtrennt; das abgetrennte Präparat ist dann aktiv, und es kann seine Halbwertszeit ermittelt werden. Da die Aktivität in Aussendung von β-Strahlen besteht, verwandelt sich dabei das betreffende Element in eines mit um 1 erhöhter Ordnungszahl (vgl. 569, z. B. Sr in Y), das entweder stabil sein kann oder weiter unter β-Strahlaussendung sich verwandelt (z. B. Y in Zr). In dieser Weise ergaben sich schon große Zahlen von Isotopen der verschiedenen Elemente.

Strahlungen im Himmelsraum.

576. Nordlicht. — Außer dem Licht — sichtbarem, ultrarotem und ultraviolettem — sendet die Sonne auch Kathodenstrahlen aus und vielleicht auch positive Strahlen. Die Nordlichter zeigen das. Die Bahnen von Elektronen, sowie von geladenen Atomen irgendwelcher Art im Magnetfeld der Erde (261) sind nach Bekanntem berechenbar (453, 454). Man findet, daß die Bahnen nach den beiden magnetischen Polen der Erde hin laufen, daß sie aber nicht bei den Polen selbst die Erde treffen, sondern in gewissem Abstand rings um dieselben, und dies entspricht ganz der lang schon bekannten „Häufigkeitszone" der Nordlichter.

Die magnetischen Eigenschaften der Strahlen geben sich auch durch Beeinflussung der Magnetnadeln („erdmagnetische Störungen") zu erkennen, die mit den Nordlichtern verbunden sind, aber auch ohne solche auftreten können. Letzteres wäre Strahlen zuzuschreiben, welche nicht genügend tief in die Atmosphäre herabdringen.

Die Sonne ist als Quelle der Strahlen durch den Zusammenhang der Häufigkeit des Nordlichtes mit der Häufigkeit der Flecken und Fackeln der Sonne festgestellt. Die Formen der Nordlichter zeigen, daß oft verhältnismäßig schmal begrenzte Strahlenbündel von der Sonne kommen. Die Häufigkeitszone, etwa in 20^0 Abstand vom magnetischen Pole, zeigt sehr geringe Ablenkbarkeit der Strahlen an, entsprechend Kathodenstrahlen von nahe Lichtgeschwindigkeit oder positiven Strahlen. Eine Unterscheidung der beiden Strahlenarten aus der entgegengesetzten Richtung ihrer Ablenkung ist nicht erfolgt, weil nur das letzte, fast senkrecht an die Erde kommende Bahnstück durch Erleuchtung der Luft sichtbar wird. Die Hinzuziehung der Beobachtungen der Spektren der Nordlichter hat auch noch keine Entscheidung zwischen positiven und negativen Strahlen gebracht. Die Tiefe, bis zu welcher die Strahlen in die Atmosphäre herabdringen, die unteren, dichteren Luftschichten dabei erleuchtend, zumeist etwa 100 km über dem Erdboden, manchmal sogar bis zu 70 km herab, zeigt sehr geringe Absorbierbarkeit der Strahlen an, wie sie schnellsten β-Strahlen oder ebensolchen positiven Strahlen entspricht. Solche Strahlen könnten radioaktivem

Zerfall von Atomen entstammen, die in den Fackeln der Sonne aus dem Sonneninneren, also von Orten sehr hohen Druckes, heraufkommen (vgl. M 305). Von den auf der Erde bisher untersuchbar gewordenen Strahlen kommen die schnellsten β-Strahlen den Nordlichtstrahlen in ihren Eigenschaften am nächsten.

577. Leitfähigkeit der Atmosphäre. — Die atmosphärische Luft zeigt stets geringe Leitfähigkeit. Zur Aufklärung des *Ursprungs der Elektrizitätsträger*, die diese Leitfähigkeit bewirken (503), haben mannigfache Kenntnisse beigetragen.

Von der Erdoberfläche her bringen Regenfälle, brandendes Meer, Vulkane und Verbrennungsvorgänge stets Träger in die Luft (134, 510). Viel allgemeiner wirksam sind die vom Erdboden aus in die Luft dringenden Strahlungen der radioaktiven Bestandteile der Erdrinde; ja sogar ein aus dem Erdboden stets erneuerter Emanationsgehalt der Luft ist samt den feinverteilt schwebenden Zerfallsprodukten der Emanationen (560) in der freien Luft stets nachweisbar. Von oben her wird die Atmosphäre durch das ultraviolette Licht der Sonne (507, O 98) und durch die Strahlen der Nordlichter — seien sie Kathodenstrahlen oder positive Strahlen (576) — leitend gehalten. Unzweifelhaft angezeigt ist das Vorhandensein einer besonders gut leitenden oberen Schicht der Atmosphäre durch das Verhalten der elektrischen Wellen der drahtlosen Nachrichtenübermittelung; die Intensitätsabnahme dieser Wellen mit wachsender Entfernung von den Aussendestellen entspricht nicht halbkugeliger Ausbreitung in den Himmelsraum, sondern eingeschränkter Fortleitung zwischen Erdoberfläche und einer ihr parallelen oberen, leitenden Schicht, ähnlich wie Drahtwellen zwischen den zwei Drähten sich ausbreiten (412), und auch Reflexionserscheinungen der Wellen von oben herab sind beobachtet.

578. Durchdringende Strahlung. — Alle die genannten Trägerbildungsvorgänge kann man ausschließen, wenn die Luft durch geeignete Filtrierung befreit von Emanationen und vorhandenen Trägern, in Gefäßen eingeschlossen wird, deren Wände frei von radioaktiven Stoffen und dick genug sind, um alle bekannten Strahlungen abzuhalten. Aber auch in solchen Gefäßen zeigt sich stets Leitfähigkeit der Luft. Da diese Leitfähigkeit durch weiteres Verdicken der Gefäßwände oder durch Umgebung der Gefäße mit dicken Schichten absorbierender Stoffe, wie Blei, oder Versenken in tiefes Wasser, vermindert wird, ist zu schließen, daß diese, von keinen bekannten Vorgängen stammende Leitfähigkeit durch eine von außen kommende, *sehr wenig absorbierbare Strahlung* verursacht wird. Dies ist die Feststellung der „durchdringenden Strahlung".

Um den Ursprung dieser Strahlung zu suchen, wurden die Versuche mit Luft in geeigneten Gefäßen an vielen Orten und besonders auch in verschiedener Höhe über dem Erdboden, im Luftballon und Flugzeug durchgeführt. Es zeigte sich, daß die Leitfähigkeit in großen Höhen über dem Erdboden (10 km, mit Registrierballonen auch 30 km) besonders groß ist. Daraus ist zu schließen, daß die Strahlung nicht von der Erde kommt, sondern außerirdischen Ursprungs ist. Daher auch der Name „*Höhenstrahlung*".

Vom Stand der Sonne ist die Strahlintensität — stets als Luftleitfähigkeit beobachtet — fast ganz unabhängig. Die Sonne erscheint also jedenfalls nicht

als Hauptquelle der Strahlung; wohl aber könnten andere, fernere Himmelskörper die Quellen sein. Dem entspricht der Name „Weltraumstrahlung".

Quantitativ festgestellt ist die außerordentlich geringe, übrigens ungefähr massenproportionale Absorbierbarkeit der Strahlung; selbst hinter 60 cm Blei sind noch Messungen möglich. Dabei zeigt sich Uneinheitlichkeit der Strahlung; es sind verschieden stark absorbierbare Anteile vorhanden, und es scheint, daß die Strahlen in Luft und anderen Stoffen selbst solche Anteile hervorrufen, ähnlich wie Kathodenstrahlen Sekundärstrahlen erzeugen oder wie Hochfrequenzstrahlen Elektronen auslösen.

Es könnte sein, daß die geringe Absorbierbarkeit der Strahlen sie von fernsten Himmelskörpern zur Erde dringen läßt, von denen sichtbares Licht durch vielleicht weit in den Himmelsräumen verbreitete, etwa auch fein verteilte, dunkle Massen abgehalten ist. Es zeigen sich solche dunkle Massen wolkenartig verbreitet vor der Milchstraße; sie umgeben auch, ringförmig, Spiralnebel; sie scheinen die Abkühlungsprodukte der großen, glühenden Himmelsgebilde zu sein.

Man kennt die Strahlen trotz vieler Bemühungen noch nicht genügend. Nach ihrer Trägerbildung und Nebelkernbildung, zusammen mit der sehr geringen Absorbierbarkeit, kommen unter Bekanntem sehr schnell bewegte Atome oder Atomteile und äußerst kurze Ätherwellen als ihre Bestandteile in Betracht.

3. Energie, Gravitation, Äther.

579. Wir stellen in diesem Schlußabschnitt Kenntnisse über Energie, Gravitation und Äther zusammen, die zwar in den verschiedenen Teilen des Werkes meist schon angeführt und begründet worden sind, die aber am besten rückschauend, im Besitz aller wohlgegründeten Naturkenntnis, gewürdigt werden können.

Gegen Ende des Abschnittes gehen wir — im Gegensatz zum gesamten übrigen Inhalt des Werkes — absichtlich teilweise über zweifellos Festgestelltes hinaus, wobei wir aber nur Gedanken hinzunehmen, die bei Benützung des fest auf Erfahrung Gegründeten sich bieten[1]). Der Geist hat immer das Bedürfnis, auch von Innen her etwas zu sagen, nachdem er die gegebene Welt von außen her nach Möglichkeit kennen gelernt hat.

580. Energie elektromagnetischer Kraftfelder außerhalb und innerhalb der Atome. — Wir erkannten die durch Kraftlinien dargestellten elektrischen und magnetischen Felder außerhalb der Atome als Energieverteilungen im Äther (122 u. f., 273 u. f.). Innerhalb der Atome der Materie fanden wir elektromagnetische Felder von großer Stärke, erkennbar an den auf die Elektronen der Kathodenstrahlen sowie auf die positiven α-Partikel ausgeübten Kräften (520, 539). Diese elektromagnetischen Felder im Atominneren, zugehörig den in den Atomen ebenfalls nachgewiesenen Elektronen und Protonen (531, 533), sind allerdings in den sehr kleinen Räumen, die diesen Kraftzentren eigen sind (486, 534, 538, 539), von unbekannter, besonderer Beschaffenheit (546). Daß diese Kraftfelder aber ebenfalls Energie enthalten und zwar, wie nach ihrer Stärke zu erwarten, große Mengen von Energie, dies

[1]) Die überall eingeschalteten Hinweise auf die zugrundeliegende Erfahrung gestatten dem Leser, sein eigenes Urteil zu bilden.

wird nach aller Gesamtkenntnis fast selbstverständlich dadurch, daß alle Energien, die außerhalb der Atome fortwährend in allen Naturvorgängen zur Beobachtung kommen, aus Atomen genommen erscheinen (129). Im besonderen wurde der große Energiereichtum der Atome durch die Erscheinungen der Radioaktivität deutlich (554); es kommt in diesen Erscheinungen Energie aus dem Atominneren nach außen in Mengen, die nach bewährten Methoden gemessen werden können.

581. Gemessene Energie aus dem Atominneren. — In Form von Wärmewirkung der radioaktiven Strahlungen (554) gibt 1 Gramm Radium-Emanation bis zur Umwandlung in RaD (558 u. f.) $2{\cdot}2 \cdot 10^9$ Grammkalorien ab, was nach direkten Messungen und den bekannten Zerfallskonstanten der Emanation und ihrer Produkte mit Sicherheit berechenbar ist. 1 Gramm Uran gibt bis zu seiner vollständigen Umwandlung, über Radium, Emanation, RaD bis zum Blei (565), entsprechend mehr Wärme ab und zwar nach Maßgabe der noch hinzuzurechnenden Strahlungen im ganzen rund $4{\cdot}5 \cdot 10^9$ Grammkalorien $= 2 \cdot 10^9$ mkgr $= 2 \cdot 10^{17}$ erg. Eben dieselbe Energiemenge wird auch aus der kinetischen Energie der 8 α-Partikel und 6 β-Elektronen berechnet (550, 551), mit Zuziehung der verhältnismäßig geringen Energie der γ-Strahlung (552), welche jedes Atom Uran ausgibt bis es Blei wird. Diese so auf zwei Wegen, aus den gemessenen Wärmemengen einerseits, aus den gemessenen Geschwindigkeiten und Massen andererseits, übereinstimmend ermittelte, sehr große Energiemenge ist unzweifelhaft in den Uranatomen enthalten[1]). Daß diese Energiemenge eine ihrer Größe entsprechende Masse hat, die durch Division mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit berechenbar ist, nämlich $2 \cdot 10^{17}$ erg/$(3 \cdot 10^{10}$cm/sek$)^2 = 2{\cdot}2 \cdot 10^{-4}$ gr, dies ist ebenfalls unzweifelhaft (434).

582. Nachweis des Gewichtes der Energie. — Man findet eine so große und gut gemessene Energiemenge, wie die im Gramm Uran, in so kleinem Volum, mit verhältnismäßig so wenig Zutaten und so störungsfrei festgehalten, in keiner anderen Weise wieder; kein noch so starkes künstliches elektrisches oder magnetisches Feld, ja kein Sprengstoff bietet auch nur angenähert dasselbe[2]).

Es bietet daher das Uran eine besondere, gute Gelegenheit zur Untersuchung der Frage: ob Energie auch ein ihrer Masse proportionales Gewicht hat, wie es alle sonst untersuchten Massen haben (M 172), ob also die Massen der Energie der Gravitation unterworfen sind?

Die Frage ist bereits bei den Massen des Lichtes bejahend beantwortet durch die Ablenkung, welche Lichtstrahlen beim Vorbeigang an der Sonne erleiden (437); aber diese Ablenkung ist keiner sehr genauen Prüfung zugänglich. Sehr fein kann dagegen das Gewicht der in den Uranatomen konzentrierten und wie angegeben festgestellten Energiemassen kontrolliert werden, wenn man Pendel aus Uran schwingen läßt. Ist der als Energie festgestellte Anteil der Uranmasse nicht entsprechend der Gravitation unterworfen, gibt es hierin einen Unterschied zwischen Energiemassen und „gewöhnlichen" Massen, so muß

[1]) Die Energiemenge ist mehr als das 2000fache der kinetischen Energie eines schweren, schnellen Geschosses (vgl. M 158).

[2]) 1 Gramm Nitroglyzerin beispielsweise liefert nur $1{\cdot}5$ Kal $= 1{\cdot}5 \cdot 10^3$ Grammkalorien (W 131).

dies als Abweichung der Schwingungsdauer eines Uranpendels von der gleich langer Pendel aus gewöhnlichen Massen nachweisbar sein (vgl. M 171, 172). Solche Versuche sind ausgeführt und zwar in großer Verfeinerung, nicht nur mit Pendeln, sondern auch nach der empfindlicheren Methode der Lotabweichungen (M 204). Es hat sich keine Abweichung gezeigt, die größer wäre als höchstens 1 Zwanzigmilliontel (Zeeman 1917). Das Gramm Uran enthält allerdings neben der als Energiemasse festgestellten Masse von $2{\cdot}2 \cdot 10^{-4}$ gr (581) noch den, fast das ganze Gramm betragenden Rest von „gewöhnlicher" Masse, bei welcher das Gewicht nicht zweifelhaft ist, und da bei den feinst durchgeführten Versuchen nicht Uranmetall, sondern Uranylnitrat $[UrO_2(NO_3)_2 + 6H_2O]$ verwandt wurde, von welchem nur 0·47 Uran ist, so beträgt hierbei die fragliche Energiemasse nur den Bruchteil $2{\cdot}2 \cdot 10^{-4} \cdot 0{\cdot}47 = 10^{-4}$ der ganzen Masse. Wäre aber dieser Bruchteil etwa gewichtslos, so würde das eine Abweichung gegeben haben, von der schon der 2000te Teil in den Versuchen sichtbar gewesen wäre. Da aber keine Abweichung sichtbar war, so folgt, daß die als Masse von nachgemessener Energie festgestellte, in den Uranatomen vorhandene Masse entweder genau oder bis auf höchstens 1/2000 auch das richtige Gewicht hat, wie alle „gewöhnlichen" Massen. Und da Energien verschiedener Formen oder verschiedenen Ursprungs alle ohne Größenänderung und also ohne Massenänderung ineinander verwandelbar sind (vgl. 435), so folgt, daß alle Energiemassen ihr entsprechendes Gewicht haben, daß Energie also in dem für alle Massen gewohnten Maße der Gravitation unterworfen ist.

Mit den schon erwähnten Lichtablenkungsbeobachtungen am Sonnenrand (437) stimmt das überein; nur ist der Nachweis am Uran viel besser.

583. Alle Massen als Energiemassen betrachtet. — Wenn demnach alle Energiemassen ihr richtiges Gewicht haben, so bleibt doch noch die Frage, wie es mit dem Gewicht der „gewöhnlichen" Massen stehe, ob nämlich diese Massen, die in demselben Maße der Gravitation unterworfen sind, wie die Energie, etwas anderes sind als Energiemassen? Diese „gewöhnlichen" Massen sind Hauptteile der Massen aller Atome; die abgetrennt untersuchbar gewordenen Teile, wie bei den radioaktiven Stoffen, Sprengstoffen usw., sind verhältnismäßig geringfügig. Die Massen der Atome sind aber als Massen der einzig in ihnen gefundenen Bestandteile, der Dynamiden, erkannt (531 u. f.), deren jede aus einem Elektron und einem Proton mit den zugehörigen elektromagnetischen Feldern besteht. Die Frage bezieht sich also auf die Massen der Elektronen und der Protonen. Die Massen der Elektronen (458) konnten ganz als Massen ihrer elektromagnetischen Felder, d. i. als Energiemassen betrachtet werden (464, 480, 485). Die Protonen (533) zeigten sich im Kern (538) der Atome vereinigt, und dieser war bei den radioaktiven Atomen als Hauptsitz von deren großen Energien anzusehen (556), aber auch bei den nichtradioaktiven Atomen als Energiesitz erkennbar (573, 575), so daß auch bei den Protonen die Masse als Energiemasse angezeigt ist (556). Besondere Massen, die nicht Energie wären, haben sich in den Atomen bisher nicht gezeigt; wir sehen daher von der Annahme solcher besonderen Massen ab.

Wir nehmen dementsprechend an, daß Massen und Gewichte der Atome nur Massen und Gewichte des Energieinhalts der

Atome sind, was damit übereinstimmt, daß die von Atomen abgesonderten Energiemassen und die Massen der Atome dem gleichen Grundgesetz aller Bewegung folgend sich zeigten, wie die materiellen Massen (436)[1]). Andere Massen als Energiemassen gibt es dann überhaupt nicht; Trägheit ist damit Eigenschaft der Energie und nur dieser.

„Masse", eingeführt als Maß der Trägheit (M 57), war schon in der ganzen Bewegungslehre (M 114 u. f.) — der Erfahrung nachgehend — wie ein besonderes Etwas zu behandeln, an dem Kräfte angreifen und dem die Eigenschaft der Trägheit wesentlich zugehört; jetzt erscheint die Energie als dieses Etwas.

Wir verfolgen diese Annahme im weiteren; wir kommen dabei zu jenem, schon bei Einführung der Energie gezeigten, gegen früher veränderten Anblick der materiellen Welt (M 157), der hier noch etwas weiter entwickelt sei.

584. Energie und Äther. — Die Materie hat jetzt ihre Sonderstellung verloren, diese wird in umfassenderer Bedeutung von der Energie eingenommen. Nicht Materie und Äther machen die den Sinnen zugängliche, materielle Welt (Einl. 5, Bd. I) aus, sondern Energie und Äther.

Die außerhalb der Materie befindlichen elektromagnetischen Felder mit Einschluß des Lichtes und der anderen Strahlungen, die man früher als Äthergebilde oder Ätherbewegungen betrachtete, erkennen wir jetzt als Energiegebilde (122 u. f., 273 u. f.), und die Materie ist auch Energiegebilde (583). Alle diese Energiegebilde sind im Äther. Der Äther (O 2, 4) erfüllt allen Raum; er ist aber nicht identisch mit dem Raum, denn er ist nicht einheitlich. Die Erscheinungen des Lichtes zeigten (O 23), daß jeder Himmelkörper seinen eigenen Äther hat; die Induktion in bewegten Leitern zeigte dasselbe für kleine Körper (405).

Ist aber Materie nur ein Sonderfall von Energieanhäufung, so ist es eine naheliegende Verallgemeinerung, nicht nur jedem Stück Materie, sondern überhaupt jeder Energiemenge ihren besonderen Äther zuzuschreiben. Der Äther, aller Äther, erscheint demnach als Zubehör der vorhandenen Energien. Außerdem regelt der Äther die Geschwindigkeit der Bewegungen der Energien gegeneinander und die Wirkungen dieser Geschwindigkeiten (129).

585. Gravitation. — Gravitation ist als Eigenschaft aller Massen erkannt (M 205 u. f., 582). Wenn aber alle Massen nur Energiemassen sind (583), so ist Gravitation, so wie Trägheit, eine Eigenschaft der Energie und nur dieser in allen ihren Formen.

Dabei kann die Gravitation der Energien gegeneinander durch deren Ätherbegleitungen (584) vermittelt sein in einer Weise, die freilich auch heute noch nicht viel weiter beschreibbar ist, wie zu Newtons Zeit. Doch sieht man, daß jede Energiemenge mittels ihrer Ätherbegleitung ebenso überall im Raume zugegen ist, wie mit ihrer Gravitation. Als Ätherwirkung zeigt sich die Gravitation auch insofern, als sie durch alles hindurchwirkt (591, M 210) und

---

[1]) Man bemerkt, daß hiernach die Verwandlung von Elektrizitätsquanten oder auch von ganzen Atomen in elektromagnetische Wellen — sowie die umgekehrte Verwandlung — nicht ausgeschlossen erscheint; sie würde dem Energiegesetz nicht widersprechen; aber genügend nachgewiesen ist derlei nicht. Bei quantenmäßigem Arbeiten — wie es für Atome gefunden ist (W 181) — kämen nur äußerst kurze Wellen für solche Verwandlungen in Betracht.

als die Lichtgeschwindigkeit — eine Ätherkonstante — für ihr Versagen maßgebend erscheint (vgl. Fußnote zu 590).

Man kann denken, daß der Äther jeder Energiemenge mit zunehmendem Abstand von ihr abnimmt mit einem Gefälle, das dem verkehrten Quadrat des Abstandes von der Energiemenge und dieser selbst proportional ist, und daß jede Energiemenge in Richtung des an ihrem Orte stattfindenden Äthergefälles nach zunehmenden Äther hin sich getrieben findet mit einer Kraft, die der Größe des Gefälles und der Energiemenge proportional ist. So erscheint die Gravitationskraft ein wenig verbunden mit sonstiger Kenntnis. Eine Mahnung gegen die Meinung, daß Alles in der Welt durch Mechanismen zu erklären sei, bleibt die alltägliche, einfache Tatsache des Fallens der Körper auf Erden aber immer.

586. Einzelbetrachtung der Formen der Energie. — Unseren Sinnen erscheint die Energie unter den fünf, schon von Robert Mayer erkannten Formen (Tab. 5, M 157; Tab. 24, W 70; Tab. 42, E 118), wobei elektrische und magnetische — elektromagnetische — Energie schon unter dem einen Namen „elektrische Energie" zusammengefaßt war.

Wir erkannten aber weiter schon die Form der Wärme als kinetische und potentielle Energie der Moleküle und Atome (W 80) und die Form der chemischen Energie als potentielle Energie der Atome (W 132), wonach als verschieden nur mehr die drei Formen: potentielle Energie, kinetische Energie und elektromagnetische Energie übrig bleiben.

Von diesen drei Formen ist die potentielle Energie (M 144, 147) an sich recht verschiedenartig, je nach der wirksamen Kraft. Die potentiellen Energien elektrischer und magnetischer Kräfte gehören ohne weiteres zur Form der elektromagnetischen Energie. Außerdem sind noch vorhanden: potentielle Energien von Gravitationskräften und von Molekularkräften und Atomkräften, d. i. elastischen Kräften (M 253 u. f.), zu welchen auch die Muskelkräfte der lebenden Organismen gehören (M 283), und von chemischen Kräften. Alle diese Kraftarten mit Ausnahme der Gravitation sind aber nach den vorhandenen Kenntnissen über die Atome und Moleküle sämtlich elektromagnetischer Natur (M 251, E 208, 209), so daß ihre potentiellen Energien auch wieder zur Form der elektromagnetischen Energie gehören. Elektromagnetisch sind aber auch die zu Robert Mayers Zeit noch nicht erkennbar gewesenen Energien des Atominneren (580).

587. Alle Energie elektromagnetisch bedingt. — Man sieht, daß hiernach nur mehr zu unterscheiden und weiter zu betrachten sind: Potentielle Energie der Gravitation, allgemeine kinetische Energie, und elektromagnetische Energie. Wir kennzeichnen diese drei zusammengefaßten Energieformen kurz als Gravitationsenergie, Trägheitsenergie und elektromagnetische Energie.

Sind aber Gravitation und Trägheit Eigenschaften ausschließlich von Energie (583, 585), so können Gravitationsenergie und Trägheitsenergie nur Energien schon vorhandener Energie sein: Energien, die zu vorhandener Energie hinzukommen, wenn besondere Umstände eintreten, nämlich Abstandsvergrößerung von Energien durch Kräfte entgegen der Gravitation dieser Energien, was Gravitationsenergie ergibt, und Beschleunigung von Energie, was Trägheitsenergie gibt. Jene andere Energie, als deren Zusatzformen die Gravi-

tationsenergie und Trägheitsenergie somit erscheinen, kann aber nur elektromagnetische Energie sein, da eine weitere Energieart nicht aufgetreten ist.

Wir werden daher für alle Energieformen in letzter Linie auf die elektromagnetische Energie verwiesen. Man kann behaupten: Alle Energie ist elektromagnetische Energie oder ist doch elektromagnetisch bedingt, ist nämlich je nach Umständen mit elektromagnetischer Energie verbunden. Wo keine elektromagnetische Energie ist, befindet sich überhaupt keine Energie.

Der Unterschied zwischen elektrischer und magnetischer Energie (273), die ineinander übergehen können (328 u. f.), ist in einer inneren Beschaffenheit der Energie zu suchen (129), der zweierlei Möglichkeiten eigen sind, entsprechend den zweierlei Kraftlinien.

588. Sitz der Energie. — Es ist nach dem Vorgebrachten niemals zweifelhaft, wie vorhandene Energie im Raum verteilt ist. Die Energie der Atome sitzt in diesen, und sonstige Energie hat, da sie auch nur in elektromagnetischen Feldern zu finden ist (587), die bekannte räumliche Verteilung dieser Felder (122 u. f., 273 u. f.).

Daß nichts weiter Fragliches über den Sitz von Energie auftritt, mag noch an einigen Fällen verdeutlicht werden, die schwierig erscheinen könnten (589 bis 593).

589. Trägheitsenergie (kinetische Energie, Energie der Bewegung) ist immer dort zu suchen, wo die bewegte Masse ist; denn sie verbreitet sich in oft unmittelbar verfolgbarer Weise von der bewegten Masse aus in die Umgebung, wenn die Geschwindigkeit der Masse vermindert wird, z. B. durch Reibung.

Ist aber Masse selbst Energie, so ist die kinetische Energie einer Masse nur als ein mit ihrer Geschwindigkeit zusammenhängender Teil der Gesamtenergie anzunehmen (587), und es ist nach dem gemeinsamen Sitz anzunehmen, daß sie auch zu denselben elektromagnetischen Kraftfeldern gehört, wie die Gesamtenergie. Demnach würde beispielsweise der Energieinhalt der elektromagnetischen Atomfelder eines durch Muskelkraft beschleunigten Körpers zunehmen, indem die durch die Beschleunigungsarbeit gegebene Energiemenge aus den elektromagnetischen Feldern des Muskels in die des angetriebenen Körpers wandert (vgl. das Kraftfeld des bewegten Elektrons, 482).

Kinetische Energie einer Masse ist immer definiert als die infolge von Bewegung vorhandene Energie (M 145). Zu ermitteln ist sie demnach immer als derjenige Teil der Gesamtenergie, welcher der Masse entzogen werden muß, um sie zur Ruhe zu bringen. Der andere Teil der Gesamtenergie, welcher auch in Ruhe vorhanden bleibt, kann „Ruhenergie" genannt werden. Kinetische Energie ist demnach stets Differenz zwischen Gesamtenergie und Ruhenergie. Die gewöhnliche Angabe $mv^2/2$ für kinetische Energie (M 146) ist nicht Definition dieser Energieform, sondern nur eine für nicht zu große Geschwindigkeiten geltende Rechenformel (vgl. 480)[1]).

[1]) Siehe die Berechnung für beliebige Geschwindigkeiten im Anh. E VI, b.

Kinetische Energie und Ruhenergie sind beide bezugsmäßig (relativ). Ein bewegter Körper hat bei unverändertem Bewegungszustand und unveränderter Gesamtenergie mehr oder weniger kinetische Energie, je nachdem man ihn in bezug auf mehr oder weniger verschieden bewegte Umgebung betrachtet; gegenüber gleichbewegter Umgebung hat er gar keine kinetische Energie, und seine Gesamtenergie ist Ruhenergie. Man sieht daraus, daß die Teilung der Gesamtenergie in kinetische Energie und Ruhenergie verschieblich ist, je nach der Umgebung, zu welcher der betrachtete Körper in Beziehung gebracht wird, so wie auch die Geschwindigkeit des Körpers je nach dieser Umgebung verschieden ist.

Daß alles was durch eine Geschwindigkeit bedingt ist, relativ sein muß, ist selbstverständlich, weil Geschwindigkeit immer relativ ist. Die Relativität folgt aber schon aus der Definition der Geschwindigkeit (M 42); eine neue Erkenntnis (manchmal als besonderes „Prinzip"[1]) hingestellt) liegt da gar nicht vor.

590. Die Energie des Lichtes und der anderen elektromagnetischen Wellen ist rein kinetisch; Ruhenergie ist in diesen Wellen nicht vorhanden. Denn diese Wellen haben stets Lichtgeschwindigkeit[2]); wird ihnen diese ihre Geschwindigkeit und damit ihre kinetische Energie entzogen, wie bei der vollständigen Absorption, so ist ihnen damit auch die ganze Energie ohne Rest entzogen[3]). Wird dagegen eine andere bewegte Masse zur Ruhe gebracht, sei es ein materieller Körper oder ein Elektron, so bleibt immer noch ein Teil der Masse als Ruhenergie (Ruhmasse) erhalten (vgl. 479).

Diese rein kinetische Energie der Wellen besteht aus gleichen Teilen elektrischer und magnetischer Energie (365). Magnetische Felder dürften überhaupt stets das Wesentliche von kinetischer Energie sein; denn sie sind nie fehlende Folge von Bewegung elektrischer Felder (328).

591. Gravitationsenergie (potentielle Energie der Gravitationskräfte). — Nach Analogie des elektrischen Feldes würde man Gravitationsenergie in dem Raum zwischen den gravitierenden Massen verteilt suchen können. Von solcher Verteilung ist aber nichts merklich[4]). Gravitation wirkt durch alles hindurch; die Ausfüllung des Zwischenraumes ist gleichgültig, im Gegensatz zu den elektrischen und auch den magnetischen Kräften. Gravitation zeigt auch keinerlei Verspätungserscheinungen, die durch die Ausbreitung der Energie im Raume verursacht sein könnten und bei den elektrischen Kräften sehr wohl in Gestalt der Wellenvorgänge beobachtet werden (M 214). Außerdem hat Energie überhaupt nicht die Eigenschaft, Gravitation zu vermitteln (diese Eigenschaft gehört

[1]) Dieses „Prinzip" ist unberechtigt weitergefristete jüdische Physik.

[2]) Wenn das Licht, welches nach oder von großen Gravitationszentren geht, wie z. B. das Licht der Sonne, dabei seine Geschwindigkeit trotz der Schwere seiner Energie nicht ändert — wie es wohl der Fall ist —, so kann dies als Anzeige einer Gültigkeitsgrenze des Gravitationsgesetzes erscheinen. Die Gravitation würde dann Null, wenn bereits Bewegung mit Lichtgeschwindigkeit in der Verbindungslinie der Massen vorhanden ist. Daß hierbei die Lichtgeschwindigkeit als maßgebend auftritt, ist in Übereinstimmung mit Bewirkung der Gravitation durch den Äther (585).

[3]) Siehe Anhang E VI, b.

[4]) Es ist daher angezeigt, den in Analogie zum elektrischen Feld (65) manchmal gebrauchten Ausdruck „Gravitationsfeld" zu vermeiden. Über den Gedanken des Äthergefälles s. 585.

wohl dem Äther zu, 585), sondern sie ist selbst das Gravitierende. Wir bezeichneten deshalb Gravitationsenergie auch schon als *Zusatz zur gravitierenden Energie*, der ihr hinzugefügt wird, wenn Kräfte an ihr gegen ihre Gravitation arbeiten (587).

Wenn also beispielsweise ein Gewicht auf Erden gehoben wird, so wandert die hebende Energie (etwa aus den Muskeln des hebenden Armes) in das Gewicht ein und vermehrt dessen Energieinhalt. Es ist dies der gleiche Vorgang, wie bei Arbeit gegen die Trägheit des Gewichts (589). In beiden Fällen, ob gegen Gravitation oder gegen Trägheit einer gegebenen Energiemenge an derselben gearbeitet wird, erhält sie einen Zuwachs. Derselbe hat dann seinen Sitz in denselben elektromagnetischen Kraftfeldern, welche die ursprünglich gegebene Energiemenge ausmachten (z. B. in den Atomen des gehobenen oder beschleunigten Körpers). Damit erscheinen *Gravitationsenergie und Trägheitsenergie so völlig gleichartig, wie es der ausnahmslos geltend gefundenen* Proportionalität von Gewicht und Masse (M 172) entspricht.

Arbeitet die Gravitation selbst gegen Trägheit, wie z. B. beim freien Fall eines Körpers, so bleibt dessen Energieinhalt ungeändert. Der *Übergang von Gravitationsenergie in Trägheitsenergie* — von potentieller in kinetische Energie — vollzieht sich *innerhalb der Kraftfelder der Atome* des Körpers. Die Nichtänderung des Energieinhaltes eines unter bloßer Gravitationswirkung bewegten, z. B. frei fallenden Körpers ist auch schon deshalb selbstverständlich, weil er ohne Beeinflussung von angrenzenden elektromagnetischen Feldern sich bewegt, welche allein Energie-Ab- oder Zuwanderung ergeben könnten.

Wenn aber der Energieinhalt des durch Gravitation beschleunigten Körpers ungeändert bleibt, so bleibt es auch seine Masse; denn Masse ist Energie. Man hat dann *Unabhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit* (vgl. 481).

592. *Zusatzenergien meist geringfügig.* — Einfache Nachrechnung zeigt, daß die Energiemengen, welche als kinetische Energie, Gravitationsenergie, chemische Energie, zu gegebener Energie hinzukommen oder von ihr abgehen (587), zumeist sehr kleine Bruchteile dieser Energie sind.

Wenn 1 gr Knallgas explodiert ist, so ist seine chemische Energie in Wärme verwandelt, die dem entstandenen Wasser vollständig entzogen werden kann. Sie wiegt aber nach der Kalorienzahl (Tab. 25, Bd. II), dem mechanischen Wärmeäquivalent und Gl. 434 nur $1{\cdot}7 \cdot 10^{-7}$ mgr, und nur so wenig fehlt dann also am Gesamtgewicht 1 gr der zu Wasser umgruppierten Wasserstoff- und Sauerstoff-Moleküle.

Fällt 1 kgr Energie (etwa 1 Liter Wasser) an der Erdoberfläche 1 m tiefer, und kommt es unten, mit Entziehung seiner beim Fall erlangten kinetischen Energie, die 1 mkgr beträgt, zur Ruhe und Erkaltung, so wird es infolge dieser Entziehung nur um 10^{-9} mgr weniger Masse haben.

Sogar die größten möglich erscheinenden Verluste von Gravitationsenergie sind gering. Würden 2000 Sonnenmassen aus unendlicher Verstreuung zu einem einzigen Ball zusammenfallen, der dann eine Temperatur von der

Größenordnung 10^{10} °C erhielte, so würde nach vollständiger Ausstrahlung der Wärme doch jedem Atom nur rund 1/1000 seiner Masse fehlen; denn nur dieser Bruchteil würde beim gedachten Zusammenfallen in kinetische Energie verwandelt[1]).

Bei Elektronen, die mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit vorkommen, nimmt die kinetische Energie allerdings erhebliche Größen an; bei 0·87 Lichtgeschwindigkeit ist die Masse des Elektrons durch Aufnahme von kinetischer Energie verdoppelt (479).

593. Energiewanderungen. — Das Energiegesetz ließ schon ursprünglich alle Vorgänge in der materiellen Welt als Energie-Umwandlungen erfassen. Jetzt, nachdem alles Materielle im Raum überhaupt nur als Energie erscheint und die Verschiedenheit von deren Formen als nur äußerlich zu erkennen sind, sind alle Vorgänge als Wanderungen unveränderlicher Mengen stets elektromagnetischer Energie zu betrachten.

Wir haben Wanderungen elektromagnetischer Energie mit und in gewöhnlichen, außerhalb von Atomen befindlichen elektromagnetischen Feldern schon in vielen Beispielen betrachtet (122—129, 215, 273, 274, 330, 480)[2]). Jetzt kommt es noch darauf an, Energiewanderungen zu betrachten, die wesentlich durch die Felder von Atomen und Molekülen ihren Weg nehmen. Es kann das bei der ungenügenden Kenntnis vom Atominneren nur in großen Zügen geschehen, wie es einige Beispiele zeigen sollen. Es scheint hierbei am meisten an der Einzelkenntnis von den Molekularkräften zu fehlen, worin, wie wir sahen (545), die bisher entwickelten Atombilder besonders versagen.

Wird Energie mittels fester Körper übertragen, wie es in Maschinen geschieht, z. B. wenn an einer Stange oder am Seile eines Flaschenzuges gezogen wird, so wandert die an der einen Stelle in den Übertragungskörper gebrachte (stets elektromagnetische) Energie durch die elektromagnetischen Felder der Molekularkräfte des Körpers (als Zusatzenergie derselben) bis an die andere Stelle des Körpers, wo sie weiter verfügbar wird. Sie kann dort etwa an einem Gewicht, das gehoben wird, als dessen (potentielle) Gravitationsenergie sich häufen. Daß das Seil oder die Stange dabei etwa in einer der Energiewanderung, die darin stattfindet, entgegengesetzten Richtung sich bewegt, ist von keinerlei Belang. Denn die Geschwindigkeit solcher Körperbewegung hat mit der Energiewanderung im Körper nichts zu tun; man kann die gleiche Energiemenge in der Zeiteinheit mit kleiner oder großer Körpergeschwindigkeit übertragen, je nachdem die angewandte Kraft groß oder klein ist; auch bezieht sich die Körpergeschwindigkeit auf die Umgebung, die Geschwindigkeit der Energiebewegung im Körper aber auf diesen.

Betrachtet man eine elastische Schwingung, wie etwa an der Unruhe einer Uhr, so sieht man dauernd eine gegebene Energiemenge aus den molekularen Kraftfeldern des elastischen Körpers in die schwingende Masse und wieder zurück hin und her wandern. Die Wanderung erfolgt ausschließlich innerhalb der materiellen Körperteile, die das Ganze zusammenhalten.

---

[1]) Die Endgeschwindigkeiten beim gedachten Vorgang würden nicht über 1/10 Lichtgeschwindigkeit gehen.

[2]) Die zusammenfassende Betrachtung siehe im Anhang E V, c.

Bei einem Schwerependel dagegen bleibt die Energie nicht nur dauernd im Pendelkörper, sondern sie sitzt im wesentlichen sogar dauernd in denselben Molekülen desselben. Vorkommende Wanderungen, entsprechend den wechselnden elastischen Beanspruchungen des Pendelkörpers und der Aufhängung, sind nebensächlich und können beliebig verringert werden. Ganz ebenso ist es bei einem nach aufwärts geworfenen Körper (im Vakuum). Die beim Wurfe ihm mitgeteilte „kinetische" Energie bleibt ihm, verteilt in seinen Atomen, auch wenn sie — bei senkrechtem Wurf — am höchsten Punkte der Bahn ganz „potentiell" oder in bezug auf die Umgebung Ruhenergie geworden ist (589 u. f.).

Wirken dagegen an Stelle der Gravitation elektrische Kräfte, so ist es anders. Die potentiellen Energien dieser Kräfte sitzen in deren Felde verteilt. Arbeiten diese Kräfte an den geladenen Körpern, wo die Kraftlinien enden, so verschwindet ein Teil des Feldes; die Energie wandert aus den sich verkürzenden Kraftlinien in den geladenen Körper und von dort aus gegebenenfalls weiter (vgl. 127, 480).

594. Äther und Geisterwelt. — Irgendwo muß der Menschengeist die Grenzen seines Begreifens finden (Einleitung 18, Bd. I), und es wird das wohl beim Äther sein, womit keineswegs behauptet ist, daß das Vordringen zu vermehrter Kenntnis, auch über den Äther, schon am Ende sei (vgl. O 2). Der Äther ist weitgehend den Sinnen entzogen; er ist fast übersinnlich. Dennoch ist sein Dasein mit Sicherheit erkennbar geworden (O 2), und es ist eine besondere, hoch einzuschätzende Errungenschaft des Menschengeistes, daß dies gelungen ist, daß das Dasein von so nahezu Übersinnlichem im Raume aus Beobachtungen, allein nur der unbelebten Natur, feststellbar geworden ist. Das Fortschreiten in der Erkenntnis von Eigenschaften eines fast übersinnlichen Naturdinges mußte freilich schwierig sein. So hat erst jetzt, 250 Jahre nach Huygens, wieder Erfahrung wesentlich neue Gedanken über die Beschaffenheit des Äthers beigebracht, nachdem inzwischen vieles vergeblich versucht war (vgl. 129). Ursprünglich schien der Äther gleichmäßig den ganzen Raum erfüllend, so gut wie identisch mit dem Raum und wie dazu gegeben, „Absolutbewegung" verfolgbar zu machen. Alle Versuche dazu sind aber gescheitert (M 46, O 138). Jetzt zeigt sich der Äther als Begleitatmosphäre der Materie und wohl überhaupt aller Energie (583, 584); er reicht weit in den Raum, wie die Gravitation, und bewirkt diese vielleicht auch (585). Wellen macht er nicht; er bedingt nur die Geschwindigkeit, mit welcher wellenförmig oder auch sonst in Kraftliniengestalt geordnete Energie — samt deren Äther — im umgebenden Äther sich ausbreitet. Die Einhaltung dieser Lichtgeschwindigkeit scheint danach, ebenso wie die Gravitation, in letzter Linie Wirkung von Äther auf Äther zu sein, und durch Äther scheint so alle Energie, also auch die Materie, ihre Kräfte zu erfahren. Einen Teil dieser Ätherеigenschaften hatten wir in Kraftlinieneigenschaften als Energieeigenschaften zusammenfassen können (58 u. f., 236 u. f.).

Etwas Besonderes ist es, daß hiernach jede Energiemenge mittels ihres Äthers überall gegenwärtig zu sein scheint. Der freie Himmelsraum, fern von den Energieanhäufungen der einzelnen Gestirne, enthält so alle Äther mehr oder weniger gleichmäßig; wir nannten das den Uräther (O 26).

Der Äther hat hiernach in seiner Zusammengesetztheit einige Ähnlichkeit mit der den Sinnen ebenfalls nicht unmittelbar zugänglichen, außerdem aber quantitativer Verfolgung gänzlich entzogenen Geisterwelt (Einleitung 1, 7, M 2, Bd. I). Es ist wohl nicht zu bezweifeln, daß derselbe Raum, der alle Äther enthält, auch irgendwie die Geister enthalte, die wir in Lebewesen an Materie gebunden um uns finden (M 284); Raum-Dinge sind diese Geister jedenfalls insofern, als sie während Lebenszeit an die von ihnen dauernd neu geformte Materie des lebenden Körpers gebunden verharren. Sie zeigen hierin merkwürdige Ähnlichkeit mit dem Äther der Körper. Aller Materie haben wir Geist als Begleiter aber nicht zuschreiben können, sondern nur den ganz großen Molekülen (W 86, M 284)[1]). Der Geist eines Lebewesens ist der Teil des Allgeistes, den seine großen Moleküle festzuhalten vermögen. Verläßt der Geist beim Tod die durch seine Wirkung dauernd instandgehaltenen Moleküle, so zerfallen dieselben. Der Geist ist dann offenbar so frei von Materie wie er es vor dem Ursprung des Lebewesens war. Diese nicht an Materie gebundenen Geister sind vielleicht auch der Bindung an Raum und Zeit überhaupt entzogen. Während sie aber an Materie gebunden sind, scheint die Möglichkeit einer Umformung und Neugruppierung der Geister mit Vereinigung schon vorhandener Geister gegeben zu sein — einer Bereicherung der Geisterwelt — unter Mitwirkung der Materie.

Es ist deutlich, daß Geist noch ferner unserem Begreifen steht als Äther. Die Geister haben viel umfassendere Eigenschaften als die Äther, deren Eigenschaften, soweit sie erfaßbar wurden, einheitlich und vergleichsweise einfach erscheinen. Das Besonderste der Geister ist, daß sie Wirkungen auf die ihnen zugehörige Materie haben (M 284), die jeder quantitativen Erfassung, also auch jeder Berechnung sich entziehen (Einleitung 7, Bd. I) und die die wunderbaren Erscheinungen des Lebens bedingen. Wunderbar ist im besonderen die Unerklärlichkeit dieser Erscheinungen aus materiell verfolgbaren Ursachen. Die bekannten Gesetzmäßigkeiten der Vererbung geben keine vollständige Erklärung der Entwicklung der Lebewesen. Das Besonderste in letzterer Beziehung ist das unzweifelhaft wiederholt auf Erden — bei der Entstehung der Arten der Lebewesen — aufgetretene Erscheinen von nicht ererbten und dann doch vererbbaren Eigenschaften. Dies wird aus dem Studium nur der materiellen Welt niemals begreiflich werden können.

Es scheint dieses, durch die geologischen Reste verbürgte, andauernd wiederholte Auftreten neuer Arten von Lebewesen auf Erden, in stufenweiser Entwickelung, Folge zu sein einer unter günstigen Lebensbedingungen in den schon vorhandenen Lebewesen auftretenden allmählichen Ausbildung vergrößerter, an Atomen und damit Möglichkeiten reicherer Moleküle (W 86), die imstande sind, schon vorhandene, auf Erden aber bis dahin mangels geeigneter Moleküle nicht verkörperbare Teile der Geisterwelt festzuhalten. Mit solcher Verkörperung neuartiger Geister ist jeweils die Entwickelung einer neuen Art von Lebewesen gegeben. Auch das erste Auftreten von Leben auf genügend erkalteten Planetenoberflächen (W 146) ist in dieser Weise aus dem ersten Verfügbarwerden und unzersetzten Verbleiben (W 124) genügend atomreicher Moleküle verständlich, die Geist aus dem Allvorrat festhalten und damit bei sonst geeigneten Bedingungen (vgl. W 89) zur Betätigung bringen können. Dieses erste Auftreten von Leben aus Unbelebtem ist submikroskopisch zu denken; es mag auf Erden für diesen Anfang der Entwickelung die erste

[1]) Wer heute noch meint, Alles lebe, übersieht den schon gut erkennbar gewordenen Unterschied zwischen Äther und Geist. Hierüber die Fußnote zu M 284.

Million Jahre, von den im ganzen verfügbar gewesenen 1000 Millionen (567), gerechnet werden.

Dem Unbegreiflichen — nur ahnungsweisen Vermutungen Zugänglichen — gegenüber steht innerhalb einigermaßen erkennbarer Grenzen das befriedigend und wohlbegründet Begriffene, dessen immerhin erhebliche Fülle darzustellen wir uns bemüht haben.

Eine gütige, alles umfassende Macht über uns zeigt sich aus dem Erforschten und dem danach zu Erahnenden. Als gütig wird sie empfunden in der Freude über jeden neu sichtbar gewordenen großen Zusammenhang, dem auch der Mensch eingeordnet ist mit dem Vorzug, ihn ein wenig begreifen zu können als Teil eines unbegreiflichen Ganzen.

ANHÄNGE

Anhang E II[1]) (zu 299). Ballistisches Galvanometer.

Man nennt ein Galvanometer „ballistisch", wenn es zur Messung von Elektrizitätsmengen (nicht Strömen) mittels erster Ausschläge (nicht dauernden Ablenkungen) benutzt wird. Das Galvanometer muß dabei möglichst ohne Dämpfung sein und die zu messende Elektrizitätsmenge muß dasselbe spätestens vor Ende des Ausschlages fertig durchflossen haben. Die Elektrizitätsmenge kann aus dem Ausschlag in Coulomb berechnet werden, wenn das Galvanometer mittels dauernder Ablenkung in Weber geeicht ist.

Die Berechnung erfolgt am einfachsten und zeigt alles Wesentliche, wenn das Galvanometer ganz ohne Dämpfung ist und wenn der Durchfluß der zu messenden Elektrizitätsmenge äußerst schnell erfolgt, wie etwa bei der Entladung einer Kleistschen Flasche[2]).

Der Ausschlag entsteht, indem der bewegliche Teil des Galvanometers (Nadel, Drehspule), getrieben von der durchfließenden Elektrizitätsmenge, als Pendel ausschlägt, das mit gewisser Anfangsgeschwindigkeit von der Ruhelage aus losgelassen ist.

Es sei e die zu messende Elektrizitätsmenge, und es ströme von dieser im Zeitelement dt die Menge de durch das Galvanometer. Der in diesem Zeitelement vorhandene Strom ist dann $J = de/dt$.

Dieser Strom übt eine Kraft auf die Galvanometernadel aus, welche aus der Eichung des Galvanometers mit bekanntem Strom berechenbar ist. Es bringe der Strom J die dauernde Ablenkung α hervor; dann ist, bei der angenommenen und bewährten Proportionalität von Stromkraft und Strom, $J = C\alpha$, wobei C die Eichungskonstante des Galvanometers ist (analog dem Reduktionsfaktor der Tangentenbussole, 288). Die Kraft des Stromes ist dann, da bei der Dauerablenkung Gleichgewicht ist, gleich der entgegengesetzten Kontrollkraft des Galvanometers, welche proportional α, also gleich $k\alpha$ ist[3]) (k ist die Direktionskraft, wie beim Pendel, vgl. Anh. M I, a, Bd. I). Nach der Eichung ist diese Stromkraft $k\alpha = kJ/C$.

Diese Kraft herrscht je nach der Stromstärke $J = de/dt$ in jedem Zeitelement dt. Die dadurch bedingte Beschleunigung dv/dt ist nach dem Grundgesetz aller Bewegung (M 115) gleich der Kraft dividiert durch die Masse m[4]). Es ist somit

$$\frac{dv}{dt} = \frac{k}{Cm}\frac{de}{dt} \quad \text{oder} \quad dv = \frac{k}{Cm}\,de\,,$$

und die Summe aller Geschwindigkeitszuwächse dv von der Ruhe aus bis zur vollen Entladung der ganzen Elektrizitätsmenge e ist danach

$$v = ek/Cm\,.$$

Mit dieser Geschwindigkeit beginnt die Galvanometernadel ihre Pendelschwingung und zwar, bei der sehr kurzen Entladungszeit, fast noch von der Ruhe aus. Die hierbei erfolgende Amplitude, der Galvanometerausschlag, ergibt

[1]) Anhang E I befindet sich in Bd. III.

[2]) Bei Dämpfung und auch wenn der Durchfluß der Elektrizität länger dauert, sind Korrektionen berechenbar, die grundsätzlich nichts Neues bieten.

[3]) Ist das Drehmoment proportional $\sin\alpha$, so ändert das die Rechnung nur unwesentlich.

[4]) Da die Bewegung drehend ist, kann von Anfang statt Kraft Drehmoment und statt Masse Trägheitsmoment gesetzt werden (M 184), was aber am Endergebnis nichts ändert.

sich aus der Bewegungsgleichung des Pendels (Anh. M I, a, Gl. 2, Bd. I) als die Amplitude S, welche zur Höchstgeschwindigkeit v gehört, d. i. als die Amplitude, von welcher aus das Pendel eben diese Geschwindigkeit in der Gleichgewichtslage erhalten würde. Es ist nach dieser Bewegungsgleichung[1]) die Höchstgeschwindigkeit (ds/dt bei $t = 0$ in der Bewegungsgleichung) $v = Sp = S\sqrt{k/m}$, was mit dem oben gefundenen v ergibt $S = e\sqrt{k/m}/C$, oder, da die Schwingungsdauer $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, $S = 2\pi e/CT$. Man findet daher die Elektrizitätsmenge e aus dem beobachteten Ausschlag S nach der Gleichung

$$e = (CT/2\pi)S .$$

$CT/2\pi$ ist der „ballistische Reduktionsfaktor" oder die „ballistische Galvanometerkonstante"; sie wird aus der gewöhnlichen oder statischen Konstanten C durch Multiplikation mit $T/2\pi$, d. i. mit $1/\pi$ der halben Schwingungsdauer gewonnen, die leicht zu messen ist.

Daß der gewöhnliche Reduktionsfaktor noch mit einer Zeit multipliziert werden muß, um Elektrizitätsmengen zu ergeben, ist von vornherein klar, weil er sonst Ströme, d. i. Quotienten aus Mengen und Zeit ergibt. Daß diese Zeit der π-te Teil der halben Schwingungsdauer ist, dies konnte nur die Durchführung der Rechnung ergeben.

Anhang E IIIa (zu 380 u. f.). Induzierende Wirkung eines sinusförmigen Wechselstromes nach dem Induktionsgesetz.

Der Primärstrom sei $i_1 = J_1 \sin pt$, wobei J_1 sein Höchstwert, t die Zeit und $p = 2\pi/T = 2\pi n$ ist, wenn T die Periodendauer, $n = 1/T$ die zeiteinheitliche Periodenzahl ist (vgl. die Erläuterungen zum analogen Fall im Anhang M I a, Bd. I).

Die gesuchte elektromotorische Kraft v_2, welche von diesem Primärstrom i_1 in einem sekundären Leiter induziert wird, ist nach dem Induktionsgesetz (341b) $v_2 = -M di_1/dt$, wenn M der gegenseitige Induktionskoeffizient der beiden Leiter ist (362). Das negative Zeichen ist notwendig, weil bei positivem di_1/dt v_2 entgegen i gerichtet ist. Danach ist

$$v_2 = -MJ_1p \cos pt = MJ_1p \sin\left(pt - \frac{\pi}{2}\right).$$

Man sieht daraus, daß die induzierte Kraft v_2 wieder sinusförmig schwankt, wie der Primärstrom i_1, daß sie aber gegen diesen um $\pi/2$, d. i. ¼ Periodendauer verspätet ist (wie es die Linie IIa in Abb. 80 darstellt). Die Deutung von $-\pi/2$ auf Verspätung ergibt sich daraus, daß t vergrößert werden muß um zum selben Wert des Sinus zu kommen, wie ohne den Subtrahenden. Die Umrechnung vom Winkel, $\pi/2$, auf Zeit erfolgt im Verhältnis $2\pi:T$, weil der Sinus je nach Ablauf von T wieder zum selben Wert kommen muß, was er bei Winkelvergrößerung um 2π tut.

Der Höchstwert der induzierten elektromotorischen Kraft, MJ_1p, ist demnach proportional dem Induktionskoeffizienten M, der maximalen Primärstromstärke J_1 und der Periodenzahl $n = p/2\pi$.

Anhang E IIIb (zu 382). Stromstärke i in einem Leiter mit dem Widerstand w und der Selbstinduktion L bei sinusförmig schwankender elektromotorischer Kraft $v = V \sin pt$[2]).

[1]) Nach der Kreiskonstruktion, Abb. 33 in Bd. I, welche Ersatz der Bewegungsgleichung ist, ist unmittelbar einzusehen, daß $v = 2\pi S/T$ $(= S\sqrt{k/m})$ sein muß.

[2]) Zur Darstellung der Schwankung durch diese Gleichung vergl. die Bemerkungen zum gleichen Falle oben, Anhang III a.

Die maßgebende Gleichung (Ohms Gesetz) ist (Gl. 363 mit dem schwankenden v als Kraft V_0)

$$iw = V \sin pt - L\, di/dt .$$

Die Vorüberlegung (382) läßt als gesuchtes Integral dieser Differentialgleichung erwarten:

$$i = J \sin (pt - \Theta) ,$$

wobei die maximale Stromstärke J mit wachsendem w, L und p sinkend, die Verspätung Θ mit L steigend zu erwarten ist.

Einsetzung dieser Zeitfunktion i in die Differentialgleichung zeigt [nach Auflösung des sin und cos(pt—Θ)], daß sie in zwei Gleichungen zerfällt, aus denen die beiden Unbekannten J und Θ gefunden werden können, womit i tatsächlich Integral der Differentialgleichung wird und somit Ohms Gesetz mit Einbezug der Selbstinduktion genügt.

Es ist hiernach

$$J = \frac{V}{\sqrt{w^2+p^2L^2}} \quad \text{und} \quad \Theta = \operatorname{arctg} \frac{pL}{w}.$$

Das Besondere des Wechselstromes ist somit der Einfluß der p-fachen Selbstinduktion L, neben dem Widerstand w, auf die Stromstärke, und die ebenfalls durch pL bestimmte Verspätung Θ.

Ist $p = 2\pi n$ genügend groß, so kommt die Selbstinduktion L zu ganz überwiegendem Einfluß. Der Widerstand w ist dann fast gleichgültig, wenn er nicht außerordentlich groß ist, und der Strom wird dann nahezu $J = V/pL$[1]). Die Verspätung des Stromes gegen die Kraft V nähert sich dann $\Theta = \operatorname{arctg} \infty = \pi/2$, was im Zeitmaß T/4 bedeutet (wie es die Linie II b in Abb. 80 darstellt; vgl. die Erläuterung zum selben Fall im Anhang IIIa).

Anhang E IIIc (zu 387, 388). Verhältnis der Stromstärken in den beiden Spulen eines Wechselstromumformers.

Die vom Primärstrom $i_1 = J_1 \sin pt$ in der sekundären Spule erzeugte, sinusförmig mit gleicher Periode schwankende Spannung hat den Höchstwert $V_2 = MJ_1p$ (Anh. IIIa). Diese Spannung V_2 erzeugt (Anh. IIIb) im sekundären Leiter den Wechselstrom wieder gleicher Periode mit dem Höchstwert (Anh. IIIb)

$$J_2 = \frac{V_2}{\sqrt{w^2+p^2L^2}} = \frac{MJ_1p}{\sqrt{w^2+p^2L^2}} .$$

Es ist also das Verhältnis der Stromstärken $J_2/J_1 = Mp/\sqrt{w^2+p^2L^2}$.

Umschließt der magnetische Kreis beide Spulen gleichmäßig mit seinen N Kraftlinien, so ist $M = Nn_1n_2$ (362) und $L = Nn_2^2$ (361), wobei n_1 und n_2 die Windungszahlen der primären und der sekundären Spule sind. Danach ist $J_2/J_1 = Nn_1n_2p/\sqrt{w^2+p^2N^2n_2^4}$, und wenn der Widerstand w der sekundären Spule klein gegen pL ist, was bei gewöhnlich gebrauchtem Wechselstrom (z. B. $p = 2\pi \cdot 50$/sek) und den Umformern mit reichlichem Kupfer zutrifft, so ist demnach $J_2/J_1 = n_1/n_2$. Die Stromstärken in den beiden Spulen verhalten sich also umgekehrt wie die Windungszahlen.

Anhang E IV (zu 397). Elektrische Schwingungen.

Es wirken an dem die Schwingung tragenden Leiterstück die elektromotorischen Kräfte:

[1]) Der Strom wird dann beim großen p schwach. Die Energie braucht deshalb aber nicht klein zu sein, wenn die mit dem Strom gleichzeitige Spannung entsprechend hoch ist.

1. infolge der Ladung der Enden die Kraft e/C, wenn e die augenblickliche Ladung, C die Kapazität der Enden ist;

2. infolge der Selbstinduktion nach dem Induktionsgesetz (341) die Kraft L di/dt, wenn L die Selbstinduktionsgröße des Leiters, i der augenblickliche Strom, t die Zeit ist (361).

Infolge der Gültigkeit von Ohms Gesetz auch für Leiterstücke (163) ist mit diesen Kräften

$$iw = \frac{e}{C} - L\,\frac{di}{dt},$$

wo w der Widerstand des Leiterstücks ist. Das negative Zeichen ist notwendig, weil die Selbstinduktion immer der Stromänderung entgegenwirkt.

Der Strom i besteht in Bewegung nur derselben Elektrizitätsmengen e, die auch an den Enden sich häufen, es ist daher

$$i = -\,de/dt$$

und zwar mit dem negativen Zeichen, weil der positive Strom Verminderung aufgehäufter positiver Elektrizität bedeutet. Hiermit wird die Gleichung von Ohms Gesetz $-w\,de/dt = e/C + L\,d^2e/dt^2$ oder

$$\frac{d^2e}{dt^2} = -\frac{e}{LC} - \frac{w}{L}\frac{de}{dt}.$$

Man bemerkt beim Vergleich mit der Gleichung einer gedämpften materiellen Schwingung, die wir im Anhang I b der Mechanik (Bd. I) entwickelt haben, vollkommene Übereinstimmung. Diese Gleichung war

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -\frac{ks}{m} - \frac{h}{m}\frac{ds}{dt};$$

es hängen also die nachfolgend unter I verzeichneten elektrischen Größen in derselben Weise miteinander und mit der Zeit t zusammen, wie die daneben-stehend unter II verzeichneten mechanischen Größen (vgl. 366):

I		II	
e	Elektrizitätsmenge	s	Weg
i	Stromstärke	v	Geschwindigkeit
1/C	reziproke Kapazität	k	Direktionskraft
L	Selbstinduktion	m	Masse
w	Widerstand	h	Reibungsgröße.

Infolge der Übereinstimmung der maßgebenden Gleichungen gelten auch alle Rechnungsergebnisse für beide Vorgänge, den mechanischen und den elektrischen, übereinstimmend. Es sind daher alle für die Pendelschwingung im Anhang M I b (Bd. I) gewonnenen Ergebnisse unmittelbar auf die elektrische Schwingung zu übertragen. Danach ist die Ladung e und infolgedessen auch der Strom i eine Sinusfunktion der Zeit mit abnehmender Amplitude. Diese Amplitudenabnahme ist um so schneller, die Dämpfung um so größer, je größer das Verhältnis w/L ist. Ist w/L verschwindend klein, so ist die Schwingung nur unmerklich gedämpft. Die Schwingungsdauer ist dann $T = 2\pi\sqrt{LC}$, und sie ist selbst bei stark merklicher Dämpfung nur sehr wenig größer. Ist aber der Widerstand so groß, daß $w^2/4L \gtrless 1/C$ wird, so erfolgt die Entladung ohne Schwingungen (aperiodisch).

Anhang E V a (zu 406). Maxwells Gleichungen.

1. Es seien

x, y, z die Koordinaten des Raumes, t die Zeit,

X, Y, Z die 3 Komponenten der elektrischen Kraft[1] in elektrostatischer Einheit (64),

L, M, N die 3 Komponenten der magnetischen Kraft[1] in elektromagnetischer Einheit (237),

} betrachtet als Funktionen von x, y, z und t,

c das Verhältnis der beiden Einheiten (300),

ε die Dielektrizitätskonstante (106),

μ die Permeabilität (251),

λ das Leitvermögen in elektrostatischer Einheit, bezogen auf den Einheitswürfel (157),

e elektrische Raumdichte in elektrostatischer Einheit.

} gegeben als Funktionen von x, y, z.

Maxwells Gleichungen haben dann die Form folgender 3 Gruppen[2]):

$$\text{I.}\quad \begin{cases} \mu \dfrac{\partial L}{\partial t} = c\left(\dfrac{\partial Y}{\partial z} - \dfrac{\partial Z}{\partial y}\right) \\ \mu \dfrac{\partial M}{\partial t} = c\left(\dfrac{\partial Z}{\partial x} - \dfrac{\partial X}{\partial z}\right) \\ \mu \dfrac{\partial N}{\partial t} = c\left(\dfrac{\partial X}{\partial y} - \dfrac{\partial Y}{\partial x}\right) \end{cases} \qquad \text{II.}\quad \begin{cases} \varepsilon \dfrac{\partial X}{\partial t} + 4\pi\lambda X = c\left(\dfrac{\partial N}{\partial y} - \dfrac{\partial M}{\partial z}\right) \\ \varepsilon \dfrac{\partial Y}{\partial t} + 4\pi\lambda Y = c\left(\dfrac{\partial L}{\partial z} - \dfrac{\partial N}{\partial x}\right) \\ \varepsilon \dfrac{\partial Z}{\partial t} + 4\pi\lambda Z = c\left(\dfrac{\partial M}{\partial x} - \dfrac{\partial L}{\partial y}\right) \end{cases}$$

$$\text{III.}\quad \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} = 4\pi e \quad \text{und} \quad \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial y} + \frac{\partial N}{\partial z} = 0\,.$$

2. Man sieht, daß jede der 2 Gruppen I und II nur deshalb 3 Gleichungen enthält, weil die elektrischen wie die magnetischen Kräfte in ihre 3 Komponenten zerlegt betrachtet werden. Daß es möglich ist, verwickelte Vorgänge im dreidimensionalen Raume mittels dieser Zerlegung vereinfachend zu behandeln, dies ist durch die stets bestätigt gefundene Anwendbarkeit des Parallelogrammsatzes auf die elektrischen sowie magnetischen Kräfte gegeben. Da die 3 Raumrichtungen einander gleich beschaffen sind, ist der Sinn dieser 6 Gleichungen vollkommen schon in je einer Gleichung der beiden Gruppen enthalten. Wir untersuchen daher im folgenden nur die beiden ersten Gleichungen I und II.

3. Die Wahl verschiedenen Einheitssystems für elektrische und für magnetische Kräfte ist hier, wie auch sonst (vgl. 331, 343) zweckmäßig; die Gleichungen I und II erhalten dadurch so nahe gleiche Form als es dem Wesen der Dinge entspricht. X, Y, Z, L, M, N haben bei dieser Einheitswahl sämtlich gleiche Dimension

---

[1]) „Elektrische Kraft" und „magnetische Kraft" (oder Feldstärke) sind hier in dem von uns stets und ausschließlich gebrauchten und definierten Sinne verstanden. X, Y, Z, L, M, N sind also die Komponenten derselben Kräfte, die wir im Haupttext stets mit E bzw. H bezeichnet haben.

Die meisten Bearbeiter von Maxwells Gleichungen führen außer diesen Kräften noch „Polarisationen", „Verschiebungen" oder sonstwie benannte Größen ein. Dies mag für Behandlung anisotroper Körper, die selbstverständlich besonders verwickelte Fälle bieten, zweckmäßig sein; Einsicht in die Natur der Dinge fördert es aber nicht, und wir haben daher diese entbehrliche Zwiespältigkeit der Begriffsbildung ausdrücklich vermieden (254).

[2]) Über den Gebrauch der runden Differentialzeichen ∂ siehe die Note im Anhang VI (Bd. II).

($cm^{-\frac{1}{2}} gr^{\frac{1}{2}} sek^{-1}$), und da ε und μ bloße Zahlen sind, das Einheitsverhältnis c die Dimension einer Geschwindigkeit hat (300), λ die Dimension sek^{-1}, e $cm^{-\frac{3}{2}} gr^{\frac{1}{2}} sek^{-1}$, so sieht man, daß sämtliche Gleichungen in bezug auf Dimensionen in Ordnung sind (vgl. 291).

Besonders zu bemerken ist, daß das Einheitsverhältnis c auch bei Benutzung nur eines einzigen Einheitssystems in den Gleichungen auftreten müßte, weil in den Gleichungen II Erscheinungen miteinander verknüpft sind, für welche teils das eine, teils das andere Einheitssystem besonders eingerichtet ist. Führte man etwa ausschließlich elektromagnetische Einheiten ein, so würde c zwar aus den Gleichungen I und von der rechten Seite der Gleichungen II verschwinden, dafür aber im ersten Glied der linken Seite letzterer Gleichungen im Nenner im Quadrat erscheinen. Man sieht, daß dieses Einheitsverhältnis nicht durch Willkür, sondern nach der Natur der Dinge in den Gleichungen auftritt, was auch noch in ganz besonderer Weise sich zeigt (unter 11 in diesem Anhang und im Anhang E V b).

4. Die Gleichungen III, schon älteren Ursprungs, deren jede nur auf eine der beiden Kraftarten sich bezieht, enthalten allgemeine Kraftlinieneigenschaften: Daß Kraftlinien niemals frei im Raume enden, daß elektrische Kraftlinien nur dort enden, wo Elektrizität sitzt, magnetische Kraftlinien überhaupt nicht enden. Die Zeit kommt in diesen Gleichungen nicht vor; sie geben nur an, wie örtlich gegebene Kraftverteilungen weiter in den Raum hinein sich fortsetzen. Man bringt diese und die anderen einfachen Kraftlinieneigenschaften nach Kenntnis derselben (68 u. f., 237 u. f., 255) meist viel besser durch Überlegung oder in Zeichnung zur Geltung, als durch Rechnung; zur Vollständigkeit der Grundgleichungen der elektromagnetischen Erscheinungen ruhender Körper dürfen aber die Gleichungen III nicht fehlen.

5. Die Gleichungen I und II stellen die Verknüpfungen der elektrischen Kräfte mit den magnetischen Kräften dar; sie sind das Besondere, von Maxwell der früheren Kenntnis Hinzugefügte (1864). Man sieht in beiden Gleichungsgruppen links zeitliche Änderungen der einen Kraftart, rechts räumliche Verteilungen der anderen Kraftart, und diese Änderungen und Verteilungen stehen als Ursache und Wirkung verbunden nebeneinander, was weiter im einzelnen zu erläutern ist (6—10 im folgenden).

Die eigentümliche, durch die rechten Seiten der Gleichungen I und II dargestellte räumliche Kraftverteilung besteht in kreisförmig um den betrachteten Punkt herum gerichteter Kraft (siehe 6). Die Ebene des Kreises ist jedesmal durch die beiden auftretenden Koordinaten gegeben, z. B. ist es in der ersten Gl. I die yz-Ebene. In der Senkrechten zu dieser Ebene, der Achse des Kreises, d. i. in der dritten Koordinatenrichtung, geht jedesmal die links stehende zeitliche Änderung vor sich; z. B. ist es in der ersten Gl. I die L-Komponente der magnetischen Kraft, die sich ändert, womit die Kreisverteilung der elektrischen Y- und Z-Komponenten verbunden ist.

6. Um einzusehen, daß die rechts stehenden Differenzen der beiden räumlichen Differentialquotienten Kreisverteilung bedeuten, denke man in der betreffenden Ebene, z. B. yz, ein Quadrat mit den Seiten dy, dz. Längs des Umfanges dieses Quadrats bleibt neben etwaiger sonstiger Kraft oder Spannung kreisverteilte Kraft oder Spannung übrig, wenn jene Differenz nicht Null ist. Denn es wirkt an der einen Quadratseite dy die Spannung (gegeben durch Kraft mal Weg, 30, 95) Ydy, an der gegenüberliegenden, um dz verschobenen Seite dy aber die dieser Verschiebung entsprechend geänderte Spannung, und nur die Differenz dieser beiden gleichgerichteten Spannungen, nämlich

$$\frac{\partial}{\partial z}(Ydy)\cdot dz = \frac{\partial Y}{\partial z}dydz\ ,$$

ergibt einen Beitrag zu kreisverteilter Spannung. Der zweite Beitrag kommt von den beiden anderen Seiten, dz, des Quadrats; er ist nach gleicher Überlegung $\frac{\partial Z}{\partial y}dzdy$. Die beiden Beiträge wirken aber — wie eine besondere, einfache Überlegung zeigt — gegeneinander, so daß ihre Differenz $\left(\frac{\partial Y}{\partial z}-\frac{\partial Z}{\partial y}\right)dydz$ die resultierende, im Kreise um die Fläche dydz herum wirkende Spannung ergibt.

Die Vorzeichen der beiden Seiten der Gleichungen I und II sind so gewählt, daß der Drehsinn der einen Kraft mit dem Änderungssinn der anderen nach dem elektrodynamischen Zusammenhang (328) stimmt. Es trifft dies zu, wenn die positiven Richtungen der x, y, z der Reihe nach übereinstimmen mit den Richtungen der Bewegung, der elektrischen Kraft, der magnetischen Kraft im elektrodynamischen Zusammenhang (Abb. 63).

7. Man sieht nun ein, daß die Gleichungen I das Induktionsgesetz für den Fall ruhender Körper (siehe 406) bedeuten, eine der Sonderaussagen des elektrodynamischen Zusammenhangs. Denn die links stehenden zeitlichen Änderungen der magnetischen Kraft bedeuten Änderungen der Zahl der Magnetkraftlinien der betreffenden Raum stelle. Diese Zahl ist in der Fläche dydz $\mu L\cdot dydz$ (253); ihre Änderung ist also $\mu\frac{\partial L}{\partial t}\cdot dydz$, und dieser Änderung soll nach dem Induktionsgesetz die in derselben Fläche dydz im Kreise herum gerichtete elektrische Spannung gleich sein (344, 405). Eben diese Gleichheit bedeutet aber Gruppe I von Maxwells Gleichungen für alle 3 Raumrichtungen (s. oben 6), wobei der Faktor c den schon erläuterten Einfluß der Einheitswahlen berücksichtigt.

8. Die Gruppe II der Gleichungen, zunächst ohne die Glieder mit $4\pi\lambda$ betrachtet, sagt genau dasselbe wie Gruppe I mit Vertauschung von elektrischer und magnetischer Kraft; sie sagt also, daß rings um die Richtung von zeitlich in Änderung befindlicher elektrischer Kraft im Kreis herum gerichtete magnetische Kraft vorhanden ist. Dies ist es aber, was nach dem elektrodynamischen Zusammenhang nicht zu bezweifeln war (407), und man findet daher auch diese Sonderaussage des elektrodynamischen Zusammenhangs in Maxwells Gleichungen aufgenommen[1]).

9. Die noch zu betrachtenden zweiten Glieder der Gruppe II, mit $4\pi\lambda$, sind überall Null wo $\lambda = 0$ ist; sie wirken also nur im Inneren von Leitern mit. Ist aber in einem Leiter elektrische Kraft X vorhanden, so fließt dort auch elektrischer Strom, dessen Stärke für die Flächeneinheit nach Ohms Gesetz $u = \lambda X$ ist. Jede elektrostatisch gemessene Mengeneinheit dieses Stromes trägt 4π elektrische Kraftlinien mit sich (74); daher ist $4\pi\lambda X$ die Zahl der zum Strome gehörenden elektrischen Kraftlinien, die senkrecht zur Stromrichtung stehend zeiteinheitlich die yz-Ebene passieren. Diese Kraftlinien bringen aber gemäß dem elektrodynamischen Zusammenhang eine rings um die Stromrichtung gehende

[1]) Maxwell war der erste, der in dieser Weise — mittels eben dieses Teils seiner Gleichungen — das, was wir zusammenfassend den elektrodynamischen Zusammenhang nennen, auch in bezug auf veränderliche elektrische Felder zur Geltung zu bringen suchte. Das Gelingen, das Zutreffen der Folgerungen aus seinen Gleichungen, ist ein besonderer Nachweis für die Gültigkeit des elektrodynamischen Zusammenhangs auch in verwickelten Fällen.

Magnetkraft mit sich (328), ganz wie es die durch das erste Glied $\varepsilon\frac{\partial X}{\partial t}$ gegebenen Kraftlinien nach dem elektrodynamischen Zusammenhang ebenfalls tun (s. oben 8). Denn dieser Zusammenhang zeigt dieselbe magnetische Kraft an, gleichgültig ob die quer sich bewegenden elektrischen Kraftlinien einem fortfließenden Strome zugehören oder ob sie in einen in Aufladung begriffenen Kondensator eintreten, dessen Platten senkrecht zum Stromleiter stehen (407). Man sieht daraus, daß beide links stehenden Glieder der Gleichungen II tatsächlich als Summanden zusammen gehören, da sie beide die gleiche Wirkung haben, die rechts stehende Kreisverteilung magnetischer Kraft zu ergeben. Auf die dabei angenommene Querstellung der Kraftlinien und die Einheitlichkeit ihrer Geschwindigkeit, nämlich Lichtgeschwindigkeit, bei allen ihren infolge ihres Querdrängens auftretenden Bewegungen, kommen wir noch zurück (11 weiter unten und Anh. Vb); sie entspricht der Erfahrung (126).

10. Man kann diese Kreisverteilung (9), die magnetische Stromwirkung, auch unmittelbar mit dem durch $4\pi\lambda X = 4\pi u$ gegebenen Strom vergleichen, wofür allerdings nur das Stromelementengesetz benutzt werden kann, das hierbei indessen nicht auf Fernwirkung, sondern nur dicht beim Strom beansprucht wird (vgl. 281). Wir können dazu alles in elektromagnetischen Einheiten messen. Es ist dann für einen Leiter vom Querschnitt $r^2\pi$ mit dem Strome $J = r^2\pi u$ nach Maxwells Gleichungen II, wenn man deren beide Seiten mit dem Stromquerschnitt multipliziert denkt, $4\pi J = 2r\pi H$, wenn H die rings am Rande des Stromquerschnittes wirkende Magnetkraft ist (vgl. 6 oben)[1]). Diese Kraft ist aber nach dem Stromelementengesetz $H = 2J/r$ (280), was die vorige Gleichung erfüllt und also die Übereinstimmung von Maxwells Gleichungen II mit dem Stromelementengesetz zeigt.

11. Inhalt von Maxwells Gleichungen I und II. — Man sieht aus dem Vorhergehenden, daß diese Gleichungen eine große Zusammenfassung der Induktionswirkungen (vgl. 7 oben), der magnetischen Stromwirkungen (9, 10 oben) und einer denselben gleichen Wirkung veränderlicher elektrischer Felder (8 oben) bieten. Sie fassen somit alles zusammen — für den Fall ruhender Körper[2]) —, was der von uns eingeführte elektrodynamische Zusammenhang (328) allerdings als selbstverständlich und sogar in größerer Allgemeinheit (vgl. 406) erscheinen läßt, was aber in Zusammenfassung und zum Teil überhaupt (vgl. 8 oben) zuerst allein nur in Maxwells Gleichungen zum Ausdruck gekommen war.

Darüber hinaus enthalten die Gleichungen noch die Annahme der einheitlichen Quergeschwindigkeit aller Kraftlinienbewegungen (s. 9 oben), sofern sie Folge des Drängens der Kraftlinien sind. Die Größe dieser Geschwindigkeit ergeben die Gleichungen selber (s. Anh. E Vb und Vc), und

---

[1]) Die mit dem Querschnitt multiplizierte rechte Gleichungsseite gibt nach 6 Spannung, welche auch im magnetischen Falle Kraft (H) mal Weg ($2r\pi$) ist.

[2]) Die „Geltung von Maxwells Gleichungen für ruhende Körper" wäre in genauerer Feststellung dahin zu erläutern, daß die mitwirkenden Körper keine Bewegung gegen den Äther der Umgebung haben sollen.

Daß der Fall der Induktion in einem quer zu den Kraftlinien eines homogenen Magnetfeldes bewegten Leiter — beispielsweise — in Maxwells Gleichungen nicht enthalten ist, ist unmittelbar einzusehen. Denn es sind in diesem Falle die zeitlichen Änderungen von L, M, N, welche in den Gleichungen die Induktion bestimmen, Null, und die tatsächlich die Induktion bestimmende Bewegungsgeschwindigkeit des Leiters kommt in den Gleichungen gar nicht vor.

zwar zeigen sie sie gleich der Konstanten c. Diese Konstante war nur als Einheitsverhältnis in die Gleichungen gekommen (s. 1 u. 3 oben); sie war in dieser Eigenschaft schon ermittelt worden (300); sie hat die Dimension einer Geschwindigkeit und ist im Zahlenwert gleich der Lichtgeschwindigkeit gefunden worden (300). Hier, in Maxwells Gleichungen, tritt sie wirklich als Geschwindigkeit auf, nämlich als die Geschwindigkeit der Ausbreitung elektrischer und magnetischer Kräfte überhaupt. Dies zeigt sich besonders durch die Ableitung der Eigenschaften elektromagnetischer Wellen aus Maxwells Gleichungen, wobei sich für deren Ausbreitungsgeschwindigkeit im materiefreien Raum diese Geschwindigkeit c ergibt (s. Anh. E Vb).

Die Bestätigung hiervon durch Herstellung dieser Wellen (417), so wie auch früher schon durch Messungen der Laufgeschwindigkeit von Stromstößen an Telegraphenleitungen (126), zeigte das Zutreffen von Maxwells großer, über früher schon gesicherte Erfahrung hinausgehender Zusammenfassung.

Sehr bemerkenswert als besonderer Erfolg von Maxwells Gleichungen ist auch die Berechnung des genauen Vorgangs der Kraftausbreitung um einen geradlinigen Oszillator (Anh. E Vb), den wir beschrieben haben (421).

Hier zeigt sich, wie die quantitative Verbindung verhältnismäßig einfacher Kenntnisse mehr ergeben kann, als man hätte meinen können mit diesen Kenntnissen zu besitzen. Auch in anderen Fällen der Anwendung sind die Gleichungen unentbehrlich, um beliebig eingehende Schlüsse aus den einfachen, zugrunde liegenden Kenntnissen zu ziehen mit der Sicherheit, nichts übersehen zu haben. Ebenso geben die Gleichungen auch allgemeinste Auskunft über alle Möglichkeiten von Kraftlinienvorgängen bei ruhenden Körpern (vgl. Anh. E Vb).

Höchst wertvoll sind Maxwells Gleichungen auch zur Vergleichung der Vorgänge in elektrischen und magnetischen Feldern, soweit man sie kennt, mit anderen Vorgängen, so besonders mit den Bewegungsvorgängen in Flüssigkeiten und Gasen, für welche eine Zusammenfassung in den Grundgleichungen der Hydrodynamik vorliegt. Wir haben das Ergebnis der Vergleichung schon im Anhang V zur Mechanik bemerkt (Bd. I), und Anh. E V b, 8 zeigt Näheres dazu: Es bestehen Analogien, die auch schon hervorgehoben wurden (129, 256); aber der Äther mit den Kraftlinien kann nicht zutreffend als Flüssigkeit oder Gas oder irgendein materielles Gebilde betrachtet werden.

Anhang E Vb (zu 421). Elektromagnetische Wellen nach Maxwells Gleichungen.

1. Wir untersuchen nach Maxwells Gleichungen den Verlauf der Kräfte im elektromagnetischen Feld außerhalb der von Leitern erfüllten Räume ($\lambda = 0$), und es seien zunächst freie Elektrizitäten nicht vorhanden ($e = 0$).

2. Um das Verhalten der elektrischen Kraftlinien allein kennen zu lernen, eliminiert man die magnetischen Kräfte L, M, N aus den Gleichungen I und II (durch Differentiation von II nach t und Einsetzen der Größen mit L, M, N aus I mit Berücksichtigung von III); man erhält so für die X-Komponente der elektrischen Kraft die Gleichung

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \qquad \text{a)}$$

und ebensolche Gleichungen auch für Y und Z.

Dies sind Wellengleichungen, erkennbar an der Gleichsetzung zeitlicher Änderung (linke Seite) mit räumlicher Änderung derselben Größe (X bzw. Y, Z, rechte Seite) unter Vermittelung einer die Dimensionen ausgleichenden Kon-

stanten (vgl. Anhang II zur Akustik, Bd. II). Da die räumliche Änderung gleichmäßig alle drei Raumrichtungen x, y, z betrifft, bedeuten die Gleichungen Kugelwellen. Die Konstante $\varepsilon\mu/c^2$ muß der Dimension nach das Quadrat einer reziproken Geschwindigkeit sein wegen des Zeitquadrates links und der Längenquadrate rechts in den Nennern; die reziproke Wurzel der Konstanten, $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle (vgl. Anh. A I und II, Bd. II).

Man kann die Kugelwellen durch Einführung des Mittelpunktsabstandes an Stelle von x, y, z näher untersuchen; am einfachsten erhält man aber Auskünfte durch Betrachtung des Sonderfalles ebener Wellen, entsprechend großem Abstand vom Mittelpunkt. Die Wellen laufen dann nur in einer Richtung; es sei das die z-Richtung; nach den beiden anderen Richtungen, x und y, ändert sich dann nichts. Die Gleichung wird deshalb

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2}\,\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 X}{\partial z^2}. \qquad \text{b)}$$

Es ist dies die Gleichung einer Transversalwelle (Querwelle, Anh. A II); transversal deshalb, weil der im Laufen nach der z-Richtung befindliche Zustand X quer zur Laufrichtung z gerichtet ist. Eine ebensolche Gleichung gilt auch für Y, was wieder eine Querwelle bedeutet. Die dritte Gleichung, für Z, verschwindet aber nach Gl. III (Anh. Va) — die Ableitungen nach x und y sind Null und $e = 0$, daher auch $\partial Z/\partial z = 0$ und zwar überall, und also ebenso $\partial^2 Z/\partial z^2 = 0$ —; ein longitudinaler Anteil der Welle ist somit nicht vorhanden.

Ein Beispiel des Kraftlinienlaufes einer elektrischen Welle ist in den Abbildungen 91 betrachtet (vgl. 7 unten).

3. Die Auskunft, welche Maxwells Gleichungen über die Änderungsvorgänge der elektrischen Kräfte im nichtleitenden Raum geben, ist also: Es sind Wellenvorgänge, und zwar ungedämpfte reine Querwellen mit der Laufgeschwindigkeit $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$. Im materiefreien Raum ($\varepsilon = 1$, $\mu = 1$) ist die Geschwindigkeit gleich jener als Einheitsverhältnis schon gemessenen und gleich der Lichtgeschwindigkeit gefundenen Konstante c (s. Anh. Va, 11). Daß nur Querwellen vorhanden sind, dies bedeutet ebensoviel, als daß die Kraftlinien nur Querbewegung mit Lichtgeschwindigkeit machen. Als Bewegungsursache der Kraftlinien ist in dem behandelten Falle ruhender Körper nur ihr gegenseitiges Drängen vorhanden, und dieses muß also bei Lichtgeschwindigkeit verschwinden, wenn dieselbe nicht überschritten werden soll (vgl. 415). Über das Zustandekommen der Lichtgeschwindigkeit, etwa von der Ruhe der Kraftlinien aus, sagen die Gleichungen a nichts aus; dies muß also an Vorgänge in Leitern oder an Bewegungen freier Elektrizitäten gebunden sein. Daß die Kraftliniengeschwindigkeit $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ gegen den Äther des Ortes gilt, ist selbstverständlich, weil nur auf diesen die Bedingung der „Ruhe der Körper" (s. Anh. Va, 11) ohne Willkür bezogen sein kann.

Ist der betrachtete Raum mit Materie erfüllt, so kommen ε und μ für die Geschwindigkeit zur Geltung. Die Permeabilität μ ist für Nichtleiter stets nahe der Einheit; nur in der Dielektrizitätskonstante ε sind erhebliche Unterschiede vorhanden. Daher ist $\sqrt{\varepsilon}$ für die Geschwindigkeit maßgebend, und da die Brechung von Wellen auf Geschwindigkeitsverschiedenheit in aneinandergrenzenden Medien beruht (O 41, 42), ist ersichtlich, daß $\sqrt{\varepsilon}$ der Brechungsexponent gegen Vakuum sein muß, was die Versuche mit dem Pechprisma auch als zutreffend gezeigt haben (429). Das „dichtere Medium", von welchem der Strahl gegen das Lot hin gebrochen wird, ist also das Medium größerer Dielektrizitätskonstante. Für die kurzen Wellen des Lichtes kommen die Eigenschwingungs-

dauern der beweglichen Elektrizitäten in den Körpern mit in Betracht, was über den Fall der Gleichungen a hinausgeht, im Anschluß an dieselben aber gesondert behandelt werden kann (O 88).

4. Eine durch die Gleichungen a oder b bestimmte „Welle" ist jede beliebige Kraftverteilung, die mit der Geschwindigkeit $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ quer weiterläuft; ist die Kraftverteilung periodisch, so ist es ein Wellenzug (vgl. A 5). Eine Übereinanderlagerung beliebig vieler Wellen, beliebiger Kraftverteilung, nach beliebigen Richtungen gleichzeitig durcheinander laufend, genügt dann ebenfalls den Gleichungen. Eine solche Übereinanderlagerung beschreibt aber vollständig alles, was bei ruhenden Körpern in Räumen außerhalb von Leitern an elektrischen Kräften vorgehen kann, sofern freie Elektrizitäten nicht da sind. Alles dies wird somit von Maxwells Gleichungen schon mit $\lambda = 0$ und $e = 0$ (vgl. 1 oben) vollständig umfaßt.

Sind freie Elektrizitäten im Raume, so treten noch deren Kraftlinien, über die vorhandenen Wellen gelagert, hinzu. Diese Kraftlinien genügen ebenfalls den Gleichungen I, II und III (Anh. Va). Beim Ruhen der Elektrizitäten werden die linken Seiten von I und II Null; die Kraftlinien haben dann die schon eingehend von uns betrachteten Formen (Abb. 78—81, 83, 87; Bd. III).

5. So wie im bisherigen (2—4) die elektrischen Kräfte für sich allein betrachtet sind, können auch die magnetischen Kräfte betrachtet werden. Man eliminiert dazu X, Y, Z aus den Gleichungen I und II und erhält Gleichungen für L, M, N, die wegen der Symmetrie von I und II in bezug auf die elektrischen und magnetischen Kräfte (bei $\lambda = 0$) genau die Formen der Gleichungen a bzw. b haben mit Ersatz von X, Y, Z durch L, M, N.

Daraus folgt, daß auch für die magnetischen Kräfte alles gilt, was unter 2—4 über die elektrischen Kräfte entwickelt ist. Auch alle Änderung von magnetischen Kräften in nicht leitendem Raum bestehen somit nur im Laufen ungedämpfter reiner Querwellen magnetischer Kraft beliebiger Form mit der Geschwindigkeit $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ in beliebiger Übereinanderlagerung; auch die magnetischen Kraftlinien machen, getrieben von ihrem Querdrängen, nur Querbewegung mit dieser Geschwindigkeit. Welches die Laufrichtungen, die Formen und Intensitäten dieser Wellen sind, dies hängt auch hier wieder von den Verteilungen der ε- und μ-Werte im Raum und von dem ab, was an den Grenzen des betrachteten Raumes, an und in den Leitern, vor sich geht.

Sind in den Leitern elektrische Ströme vorhanden (λ und X beide nicht Null, vgl. Anhang Va, 9, 10), so sind an deren Grenzen die durch die Gleichungen II bestimmten magnetischen Kräfte vorhanden, die nach Gl. III auch in den übrigen Raum sich fortsetzen. Sind die Ströme konstant, so ergeben sich die von uns in vielen Beispielsfällen schon betrachteten magnetischen Kraftlinien (Abb. 22 bis 56, auch 6—14), die den mit Lichtgeschwindigkeit laufenden Kraftlinien überlagert sein können.

6. Die so bestimmten elektrischen und magnetischen Wellen sind nicht unabhängig von einander, sondern sie müssen stets gleichzeitig mit einander auftreten, wie es die ursprünglichen Gleichungen I und II angeben. Statt aus diesen Gleichungen kann man einfach aus dem ihnen zugrunde liegenden elektrodynamischen Zusammenhang entnehmen, daß in den mit Lichtgeschwindigkeit laufenden Wellen stets elektrische und magnetische Kraft senkrecht aufeinander stehen müssen, so wie sie beide senkrecht zur Laufrichtung stehen und daß sie beide von gleicher Stärke sein müssen, jede dabei in ihrem eigenen Einheitssystem gemessen. Dies gibt die vollständige elektromagnetische

Welle (417 u. f.), die wir auch als Lichtwelle schon betrachtet haben (O 3, 79, 85, 88, 90, 92, 176).

7. Ein besonders bemerkenswertes Beispiel der Untersuchung elektrischer und magnetischer Kräfteausbreitung nach Maxwells Gleichungen ist das des geradlinigen Oszillators, welches wir in den Abbildungen 91 betrachteten (421). Die Abbildungen geben Augenblicksbilder der elektrischen Kraftlinien; die — außerhalb der Zeichnungsebene laufenden — magnetischen Kraftlinien haben wir ebenfalls beschrieben. Diese Kraftverteilungen sind gefunden, indem die Größen X, Y, Z, L, M, N als Funktionen von Raumkoordinaten und Zeit so zu bestimmen gesucht wurden, daß sie den Gleichungen I, II und III genügen und dabei im Mittelpunkt übereinstimmen mit den Kräften, welche ein kurzer geradliniger Wechselstrom nach dem Stromelementengesetz und nach Coulombs Gesetz in seiner nächsten Umgebung verbreitet. Dies müssen dann zufolge des Inhalts der Gleichungen auch im ferneren Raum die zu solchem kleinen Oszillator gehörigen Kräfte sein, was, wie bemerkt (421), die Erfahrung bestätigt hat. Diese so gefundenen Kräfte setzen sich aus dreierlei Wellen zusammen, die alle mit Lichtgeschwindigkeit vom Oszillator weglaufen, aber sehr verschiedenen Amplitudenabfall in verschiedenen Richtungen haben; ihre Übereinanderlagerung gibt die in den Abbildungen 91 dargestellten Kraftlinien. Am langsamsten fällt die rein quer vom Oszillator weglaufende Hauptwelle ab, die in großen Abständen fast allein übrig bleibt; die zweite, schneller abfallende Welle kann man den veränderlichen magnetischen Stromkräften des Oszillators zuschreiben, die dritte, äußerst schnell abfallende Welle den Kraftlinien der bewegten elektrischen Ladung des Oszillators. Jede dieser Kraftausbreitungen muß nach dem elektrodynamischen Zusammenhang beide Kraftarten umfassen, und alle Kräfte zusammen müssen im ganzen Raum den Kraftlinieneigenschaften genügen. Keine Summe von Einzelüberlegungen könnte dem gerecht werden; nur die Gleichungen vermögen das zu bewirken, und man sieht hier ein charakteristisches Beispiel ihres und der mathematischen Hilfe unersetzlichen Wertes.

Besonders bemerkenswert ist es, daß die Kraftlinien der Abb. 91, welche die Gesamtheit der angegebenen Wellenkräfte darstellen, in der Nähe des Oszillators mit Überlichtgeschwindigkeit laufen (421), obgleich die einzelnen Wellen nur Lichtgeschwindigkeit haben. Es ist dies wohl so vorzustellen, daß früher vom Oszillator abgegangene Energie der wenig abfallenden Wellen voranläuft, während später abgegangene Energie der schnell abfallenden Welle mehr seitwärts sich ausbreitet und daher in der voranlaufenden Wellensumme fehlt, so daß diese fast allein bleibt und damit einen schnelleren Lauf der später abgegangenen Energie vortäuscht. Man hat hier ein Beispiel davon, daß Wellengemische abnorme Ausbreitungsgeschwindigkeiten zeigen können („Gruppengeschwindigkeit", verschieden von der Laufgeschwindigkeit der Energie). Auch sieht man, daß Kraftlinien zwar immer Energie enthalten, nicht aber immer dieselbe Energie; nur wenn man einfache Wellen einzeln betrachtet, bei welchen die aufeinander senkrecht stehenden Kräfte der beiden Arten auch immer von gleicher Größe sind, haben die Kraftlinien fortdauernd identischen Energieinhalt, und ihre quere Laufgeschwindigkeit ist gleich der Laufgeschwindigkeit der Energie, nämlich Lichtgeschwindigkeit.

8. Vergleichung mit elastischen Wellen. — Der im Anhang V (6) zur Mechanik (Bd. I) angedeuteten Verwandtschaft der elastischen Grundgleichungen mit Maxwells Gleichungen entspricht es, daß die elektrischen Wellen große Ähnlichkeit mit den Querwellen in festen elastischen Körpern haben (s. über diese Wellen Anh. A IV, Bd. II). Die nähere Untersuchung der Gleichungen

zeigt, daß die Querverschiebungen der Teile eines festen Körpers analog sind den elektrischen Kräften. Diese elastischen Verschiebungen verteilen und verhalten sich demnach bei Ausbreitung einer elastischen Querwelle in dem Körper so, wie die elektrischen Kräfte in der elektrischen Welle im nichtleitenden Raum. Ein Unterschied liegt jedoch darin, daß das Analogon zur stets gleichzeitig vorhandenen magnetischen Welle im materiellen Körper fehlt und daß außerdem der feste Körper neben den Querwellen stets auch Längswellen gibt, die den elektrischen und magnetischen Kräften nicht eigen sind. Sollte ein fester Körper nur Querwellen und keine Längswellen in seinem Inneren geben, so müßte seine elastische Konstante $\mu = 1$ sein (es wäre dann die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Längswellen Null, s. Anh. A IV). Einen solchen Körper gibt es aber nicht (es ist stets $0<\mu<\frac{1}{2}$, vgl. M 261); er würde negative Zusammendrückbarkeit Z haben (M 267), d. h. bei allseitigem Druck sein Volum vergrößern. Gäbe es einen solchen Körper, so wären die inneren Erzitterungen, welche, von außen her erregt, ihn in mannigfacher Weise durchlaufen können, in Verteilung und Verhalten vollkommen analog den als Wellen im Äther sich ausbreitenden elektrischen Kräften. Doch sind elektrische Kräfte überhaupt keine Verschiebungen — etwa des Äthers —, sondern sie sind Energieverteilungen im Äther, darstellbar durch die Kraftlinien (129), und es muß daher die früher gesuchte tiefere Bedeutung der Analogie fehlen.

9. Ausbreitung von Spannung und Strom an einer Leitung (zu 126, 412). — Das Verhalten der elektrischen und magnetischen Kräfte im Raum zwischen zwei parallelen, einen Strom hin- und zurückführenden Leitern und um dieselben ist ebenfalls durch Maxwells Gleichungen gegeben. Man kann aber auch in einfacher Weise nach dem Zustand an und in den Leitern fragen, nämlich nach dem Strom J, der in ihnen fließt, wenn beliebig veränderliche Spannung V an die Leitung gelegt ist, wobei auch merkliche Kapazität der Leitung und Isolationsverluste an ihr angenommen seien. Sowohl J als V sind dann Funktionen der Längskoordinate z der Leitung, die wir unbegrenzt annehmen, und der Zeit t. Es gelten hierfür folgende beide, bemerkenswert gleichgebaute Gleichungen:

$$-\frac{\partial V}{\partial z} = WJ + L\frac{\partial J}{\partial t} \qquad a)$$

$$\text{und} \quad -\frac{\partial J}{\partial z} = AV + C\frac{\partial V}{\partial t}\ . \qquad b)$$

W, L, A, C sind dabei vier Konstante zur Beschreibung der Leitung, nämlich W der Widerstand, L die Selbstinduktion, A der Isolationsmangel (reziproker Isolationswiderstand), C die Kapazität, alle vier gerechnet für je 1 cm der Leitung[1]).

Der Sinn der beiden Gleichungen ist einfach. Die erste ist Ohms Gesetz auf 1 cm Leitung bezogen (Gl. 363). Die zweite besagt die Unveränderlichkeit der Elektrizitätsmengen des Stroms, wie bei jeder Stromverzweigung (167), wieder für je 1 cm Leitung; AV ist dabei der durch Isolationsmangel seitwärts fließende Strom, $C\partial V/\partial t$ der die Kapazität aufladende Stromanteil.

Aus V und J, welche durch die beiden Gleichungen bestimmt werden, wären dann auch die Kräfte im Raum herzuleiten.

Die mathematische Bearbeitung der Gleichungen zeigt für den Fall einer

[1]) Was die Einheiten betrifft, so kann bei z cm, im übrigen das technische elektromagnetische (QUS) System (292) benutzt werden. Die Selbstinduktion, der Dimension nach eine Länge, hat dann den Erdquadranten zur Einheit (der Erdquadrant wird manchmal auch „Henry" genannt).

plötzlich an die Leitung geschalteten Spannung[1]), daß dieselbe mit der Geschwindigkeit $v = 1/\sqrt{CL}$ an der Leitung fortschreitet, dabei aber nach der Exponentialfunktion $e^{-\gamma z}$ abgeschwächt wird. Für die die Abschwächung bestimmende Konstante γ gilt dabei

$$\gamma = \frac{1}{v}\left(\frac{A}{2C} + \frac{W}{2L}\right).$$

Man sieht, daß bei vollkommener Isolation und verschwindendem Widerstand ($A = 0$, $W = 0$) keine Abschwächung eintritt ($\gamma = 0$). Bei langen Leitungen, wie bei überseeischen Telegraphenkabeln, wird γz auch bei kleinem A und W groß, somit die Abschwächung sehr merklich. Man sieht aber, daß dies nicht — wie man früher meinte — durch die große Kapazität C der Kabel bedingt ist (die Spannungsquelle liefert leicht die zum Aufladen des Kabels nötige Menge nach), sondern durch die kleine Selbstinduktion L, welche Kabeln wegen des geringen Kraftlinienraums zwischen den beiden Leitern eigen ist (284, 361). Man verbessert daher solche Kabel durch Einfügen von Spulen mit großer Selbstinduktion.

Die Gleichung für γ gilt auch für elektrische Wellen in den Kabeln (Drahtwellen, 412, 432), nur sind dabei A und W frequenzabhängig. Für A ist bei schnellen Schwingungen nicht so sehr der Isolationsmangel maßgebend, als vielmehr der Energieverlust durch die fortwährende Umkehrung der dielektrischen Verschiebungen im Dielektrikum (113), für W kommt, vergrößernd, der Hauteffekt (385) in Betracht.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit $v = 1/\sqrt{CL}$ ist sehr nahe Wellengeschwindigkeit $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ in dem Stoffe mit der Dielektrizitätskonstante ε und der Permeabilität μ, welcher den Kraftlinienraum der Leitung füllt, bei Kabeln also im Isolierstoffe. Ist $\varepsilon = \mu = 1$, wie sehr nahezu bei Luftleitungen, so ist v nahe c, Lichtgeschwindigkeit. Man sieht dies ein, wenn man bedenkt, daß die Kapazität C bedingt ist durch die Zahl der elektrischen Kraftlinien, die im Zwischenraum der Leiter bei Einheitsspannung sich ausbilden (47, 73), die Selbstinduktion L aber durch die Zahl der magnetischen Kraftlinien im selben Zwischenraum bei Einheitsstrom (361). Die erstere Zahl ist um so größer, die letztere um so kleiner, je enger der Zwischenraum; dementsprechend sind C und L einander nahe verkehrt proportional, so daß ihr Produkt nahezu immer dasselbe ist. Beispielsweise ist die elektrostatisch in cm gemessene Kapazität von 1 cm Paralleldrahtleitung beim Drahtradius r und Mittelpunktsabstand d der Drähte im Vakuum $1/4 \log (d/r)$ und die Selbstinduktion, elektromagnetisch in cm bemessen, je cm $4 \log (d/r) + 1$, wobei mit $d = 10$ cm und $r = 0{\cdot}2$ cm $4 \log (d/r) = 15{\cdot}7$, also viel größer als 1 ist. Es wäre daher in diesen Einheiten nahezu $CL = 1$ (genauer $16{\cdot}7/15{\cdot}7$ im Beispielsfall). In den in Gl. a und b vorausgesetzten, rein elektromagnetischen Einheiten ist die Kapazität c^2-mal kleiner (vgl. 300), daher nahezu $1/\sqrt{CL} = c$, wie behauptet, oder $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ wenn die Kraftlinien in einem Medium laufen, das ε-fache Kapazität und μ-fache Selbstinduktion gibt.

Die Geschwindigkeit zeigt sich noch näher gleich Lichtgeschwindigkeit, wenn man bedenkt, daß zur Berechnung der Kapazität alle Elektrizität an der Oberfläche der Drähte befindlich, für die Selbstinduktion aber im Querschnitt verteilt angenommen ist, was nicht gleichzeitig der Wirklichkeit entspricht; ist der Strom ganz an der Oberfläche konzentriert (Hauteffekt, 385), wie es

[1]) In solcher plötzlicher Spannungsanschaltung am einen Ende besteht die gewöhnliche Verwendung von Fernleitungen (Luftleitungen und Kabeln) bei der Telegraphie; jedes einzelne Zeichen wird durch kürzere oder längere Dauer der Spannungsanschaltung gegeben.

bei schnellem Stromwechsel der Fall ist, so sind C und L noch näher einander reziprok. Man bemerkt auch, daß unter allen Umständen sehr nahe $v = c$ wird, wenn die Drähte sehr dünn und sehr weit voneinander abstehend sind [4 log (d/r) sehr groß gegen 1].

Auch für Kabel gilt ähnliches. Es ist bei den Radien R und r der einander gegenüberstehenden zylindrischen Leiteroberflächen $C = 1/2 \log (R/r)$ und bei dünnem Außenleiter $L = 2 \log (R/r) + \frac{1}{2}$, beides in cm/cm. Es wird daher, bei $R/r = 10$, $v = 0{\cdot}95\, c/\sqrt{\varepsilon}$, wenn ε die Dielektrizitätskonstante des Isoliermittels (und $\mu = 1$) ist.

Man sieht, daß Luftleitungen von gewöhnlicher Beschaffenheit nach den Gleichungen a und b, welche allgemeinste, bewährte Erfahrung enthalten, immer nahe Lichtgeschwindigkeit für die Ausbreitung angelegter Spannung geben. Die deutlich etwas geringeren Geschwindigkeiten, welche an Telegraphenleitungen gemessen wurden (126), sind wohl als Folge starker Abschwächung durch Isolationsmangel und Widerstand zu erklären, da die Ankunftszeichen (Funken) eine gewisse Höhe der Spannung erfordern, die nicht mit dem Anfang der Welle, sondern erst verspätet eintritt. Eine Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit vom Widerstand kann nicht gefolgert werden; die gut begründeten Gleichungen zeigen die Geschwindigkeit unabhängig vom Widerstand.

Allgemein hat man das Ergebnis, daß die Geschwindigkeit der Ausbreitung von Spannung an Leitungen um so näher gleich ist der ohne Leitungen im Stoffe des Zwischenraums geltenden Quergeschwindigkeit von Kraftlinien (siehe 3 oben), $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$, je weniger Raum die Leiter selbst einnehmen. Dies zeigt, daß auch bei der von Leitern geführten Kräfteausbreitung das Wesentliche die Querbewegung der Kraftlinien im Raum um die Leiter ist. Daß die Kraftlinien beim Gleiten an den Leitern schief an denselben enden müssen — je nach dem Widerstand der Leiter (162) —, ändert also nichts an der Quergeschwindigkeit der Kraftlinien, die im Zwischenraum, wo die Ausbreitung stattfindet, senkrecht zu den Leitern stehen müssen.

Wenn die Spannung an die Leitung geschaltet wird, im Augenblick des Entstehens des Stromes in derselben, ist die Elektrizität noch in Ruhe; sie sitzt daher an der Oberfläche; die Kraftlinien dringen noch nicht in die Leiter ein. So wie aber die elektrischen Kraftlinien in Bewegung kommen, erzeugen sie nach dem elektrodynamischen Zusammenhang die um die Leiter herumgehenden Magnetkraftlinien, und das Querdrängen derselben treibt die Enden der elektrischen Kraftlinien in die Leiter hinein. Daraus geht die Gleichverteilung der strömenden Elektrizität im ganzen Leiterquerschnitt hervor, wenn dazu genügende Zeit vorhanden ist. Sind aber die Ströme nur kurzdauernd oder wechselnd, so ist für das Eindringen der Kraftlinien in die Leiter nicht Zeit vorhanden; der Strom bleibt dann Oberflächenvorgang (Hauteffekt, 385). Die erforderliche Zeit ist um so größer, je besser die Leitung, je geringer der Widerstand ist; denn die Verspätung kommt von den Extraströmen beim Eindringen der Magnetkraftlinien in die Leiter (385).

Anhang E V c (zu 330, 593). Wanderungen der Energie nach Maxwells Gleichungen.

Wir sahen, daß elektrische sowie auch magnetische Kraftlinien räumliche Energieverteilungen angeben, und wir haben auch die Wanderungen der Energie in Zusammenhang mit den Bewegungen der Kraftlinien im allgemeinen und in Beispielsfällen betrachtet (122—129, 215, 273, 274, 330, 480).

Elektrische und magnetische Energie ist überhaupt — außerhalb der Atome —

nur an Kraftlinien bekannter Eigenschaften vorhanden; wenn sie wandert, müssen Kraftlinien wandern. Die elektrische Energie einer bewegten, geladenen Kleistschen Flasche wandert z. B. unzweifelhaft mit der Flasche, weil ihr Kraftlinienfeld mitwandert.

Man kann aber die Menge der durch eine gegebene Fläche in gegebener Zeit hindurchwandernden Energie im allgemeinen nicht einfach aus Zahl und Länge der hindurchwandernden Kraftlinien berechnen, weil der Energieinhalt der einzelnen Kraftlinie im allgemeinen nicht konstant ist, sondern vom gegenseitigen Abstand der Kraftlinien abhängt (124), der bei der Wanderung im allgemeinen sich ändert. Außerdem sind die Bewegungen der Kraftlinien elektromagnetischer Felder überhaupt noch nicht so eingehend untersucht[1]), daß man schon wissen könnte, ob und wie die Wanderungen der Energie in allen Fällen durch Kraftlinienbewegungen darstellbar sind.

Es ist daher von großer Wichtigkeit, daß aus Maxwells umfassenden Gleichungen ein jedenfalls für ruhende Körper allgemeingültig zu erwartender Satz über die Energiewanderung in elektromagnetischen Feldern hergeleitet ist (Gl. a, Poynting 1884).

Man betrachtet dazu einen von einer Fläche umschlossenen Raum, der nur Nichtleiter enthält, und berechnet nach Maxwells Gleichungen I und II (Anh. E V a) die zeitliche Änderung des elektrischen und magnetischen Energieinhaltes dieses Raumes, d. i. die zeitliche Änderung der über alle seine Elemente genommenen Summe von $(\varepsilon/8\pi)E^2 + (\mu/8\pi)H^2$ (123, 365). Man findet, daß diese zeitliche Änderung auf die Elemente der umschließenden Fläche verteilt werden kann, so daß durch jede Flächeneinheit in der Zeiteinheit die Energiemenge

$$\frac{c}{4\pi} EH \sin\alpha \qquad a)$$

ein- oder austritt, wenn E und H die in die Fläche fallenden Komponenten der elektrischen und magnetischen Feldstärke sind und α der Winkel, welchen die beiden Felder miteinander bilden.

Dies ist folgendermaßen zu deuten:

Daß nur die in der Durchgangsfläche der Energie liegenden Kraftkomponenten E, H in Betracht kommen, dies bedeutet, daß die Energie überhaupt nur quer zu den Kraftlinien wandert. Wir fassen das dahin auf, daß sie mit den Kraftlinien wandert, denen — wie wir fanden (Anh. E V b, 3) — infolge ihres Drängens eben die Querbewegung eigen ist.

Der $\sin\alpha$ bedeutet, daß nicht E und H selber, sondern nur aufeinander senkrecht stehende Kräfte der beiden Arten bestimmend sind für die Energiewanderung. Dabei ist es einerlei, ob $\sin\alpha$ als Faktor zu E oder zu H genommen wird, d. h. ob von E oder von H die zur anderen Kraft senkrechte Komponente genommen wird, da das Produkt der beiden Kräfte maßgebend ist.

Damit erkennen wir als das Hauptstück dieses Energiewanderungssatzes den — also auch hier wieder grundlegenden — elektrodynamischen Zusammenhang (328), bei dessen Betrachtung sich schon zeigte, daß Energiewanderung stets in Richtung senkrecht zur Ebene der elektrischen und der zu ihr gehörigen magnetischen Kraft stattfindet (329). Der elektrodynamische Zusammenhang (Abb. 63) gibt auch stets ohne weiteres und am einfachsten eindeutig die Richtung der Energiewanderung an, sobald die Richtungen von E und H bekannt sind.

[1]) Die Gesamtheit unserer Darstellung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen ist darauf eingerichtet, einer solchen Untersuchung zu dienen.

Im einfachsten Fall, wenn eine ebene elektromagnetische Welle im materiefreien Raum mit ihrer Geschwindigkeit c und den beiden aufeinander senkrecht stehenden und einander gleichen Kräften $E = H$ läuft, besteht die Energiewanderung in Strahlrichtung in Fortbewegung einer unveränderlichen Kraftliniengruppierung mit dieser Geschwindigkeit c. Es muß dann die in der Zeiteinheit die Flächeneinheit durchsetzende Energiemenge gleich sein dem Produkt aus dem Energieinhalt der Volumeinheit und der Geschwindigkeit c. Dies stimmt auch mit Gl. a überein, denn es ist bei $E = H$ und $\alpha = 90^0$ $c \cdot (1/8\pi)(E^2 + H^2) = (c/4\pi)EH\sin\alpha$. Auch bei einer ebenen Welle im Dielektrikum, wo wieder die beiden Energien gleich sind, $\varepsilon E^2 = \mu H^2$, und $\alpha = 90^0$, besteht die Energiewanderung, in Übereinstimmung mit Gl. a, in Fortbewegung der Kraftliniengruppierung mit der Wellengeschwindigkeit $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$.

Wenn Energie durch elektrischen Strom zwischen zwei Leitern (Hin- und Rückleitung) übertragen wird, die man zur Vereinfachung der Rechnung als zwei parallele Bänder von der (großen) Breite b und dem (kleinen) Abstand a denken kann, so ist bei der Spannung V, dem Strom J und verschwindend kleinem Widerstand überall zwischen den Leitern $E = V/a$ in elektrostatischen Einheiten und $H = 4\pi J/b$ in elektromagnetischen Einheiten (302). Die Energieübertragung durch die Flächeneinheit in der Zeiteinheit ist dann nach Gl. a $(c/4\pi)EH\sin\alpha = cVJ/ab$, im ganzen also cVJ, was mit dem Produkt aus Spannung und elektrostatisch gemessener Menge in der Zeiteinheit (119) stimmt. Gl. a gibt also dieselbe richtige Energielieferung, die man auch aus der gegen die elektrischen Kräfte geleisteten Arbeit berechnet, und dies war zu erwarten, weil nur ruhende Körper und der Raum außerhalb der Leiter in Betracht kamen.

Dieselbe richtige Energielieferung durch Strom wird berechnet, wenn man die magnetischen Kraftlinien ruhend, die elektrischen Kraftlinien quer mit derjenigen Geschwindigkeit, $v = cH/E$, samt ihrem Energieinhalt fortbewegt annimmt, bei welcher sie das Magnetfeld H hervorbringen (331). Nur muß dabei der Energieinhalt der Volumeinheit des Feldes E der elektrischen Kraftlinie nicht $(1/8\pi)E^2$, sondern verdoppelt gerechnet werden. Die Verdoppelung stimmt damit, daß die Stromquelle hier dauernd gegen die volle Spannung V arbeitet, nicht durchschnittlich gegen V/2, wie es bei der Berechnung von $(1/8\pi)E^2$ angenommen war (119, 123).

Wenn ein ruhender Magnet und ein ruhender elektrischer Körper so zusammenstehen, daß ihre Kraftlinien einander durchkreuzen, so ist kein Anlaß anzunehmen, daß an den Kreuzungsstellen Energie in Bewegung sei. Formelle Deutung[1]) der Gl. a würde zwar solche Energiebewegung anzeigen, jedoch ist zu bedenken, daß E und H in der Gl. a nichts anderes bedeuten können als in Maxwells Gleichungen I und II, aus welchen Gl. a hergeleitet ist, nämlich: miteinander wie Ursache und Wirkung verbundene elektrische und magnetische Kräfte (Anh. V a, 5), und es fehlt diese Verbindung in dem gewählten Beispiele, für welches daher Gl. a nicht notwendig gültig sein muß. Dies beseitigt einen gegen Gl. a aufgetretenen Einwand.

Man sieht, daß der Satz, Gl. a, sehr wohl zum Ausgangspunkt der nötigen weiteren Untersuchungen über Energiewanderungen in gewöhnlichen elektromagnetischen Feldern genommen werden kann. Innerhalb der Atome sitzt Energie wohl ebenfalls in elektromagnetischen Feldern, nur sind diese Felder nicht so vollständig durch Kraftlinien der bekannten Eigenschaften darstellbar (546). Eine Einzeluntersuchung der z. B. bei Maschinen rein mechanischer Art

[1]) Eine Versäumnis des stets notwendigen Denkens mit der Natur (statt nur mit Formeln, vgl. Einleitung 15 in Bd. I).

alltäglichen Energiewanderungen durch die Atome und Moleküle fester Körper liegt daher noch ferner; in groben Zügen sind diese Wanderungen nichtsdestoweniger schon jetzt gut erkennbar (593).

Anhang E VI. Masse und kinetische Energie bei großen Geschwindigkeiten.

a) Beschleunigung einer Masse m durch ihr zugeführte Energie $\mathfrak{E}$ (zu 480).

Es wirke eine gleichbleibende Kraft K auf eine Masse m, wobei deren Geschwindigkeit v nach Galileis und Newtons Grundgesetz

$$\frac{d(mv)}{dt} = K \qquad \text{(M Gl. 116 b)}$$

geändert wird. Es werde dabei im Zeitelement dt der Weg ds zurückgelegt und die Energie $d\mathfrak{E}$ von der Masse aufgenommen, die dadurch um dm wächst.

Nach Hasenöhrls Gedankenversuch (434) ist $dm = d\mathfrak{E}/c^2$, während nach der Definition der Arbeit $d\mathfrak{E} = K \cdot ds = Kvdt$ ist.

Diese beiden Gleichungen zusammen geben $c^2dm = Kvdt$ und also, mit dem Grundgesetz, $c^2dm = v \cdot d(mv)$ oder

$$c^2dm = v \cdot mdv + v^2dm,$$

und dies ist die Gleichung — eine Differentialgleichung —, welche die Masse m als Funktion der Geschwindigkeit v zeigt. Man integriert diese Gleichung leicht und erhält

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \,. \qquad \text{a)}$$

Die Bedeutung der Integrationskonstante m_0 ist dabei unmittelbar zu sehen; sie ist die „Ruhmasse", nämlich der Wert von m bei $v = 0$.

Hiermit ist die Herleitung der wichtigen, bei den Kathodenstrahlmessungen (479) bewährten Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse aus einfachsten, schon lange wohlbegründeten Gesetzen gezeigt.

Es ist danach kein Anlaß zu zweifeln, daß diese Abhängigkeit, Gl. a, überall gilt, wo die Voraussetzung der Rechnung, nämlich Aufnahme der Beschleunigungsarbeit in die Masse gilt. Als nicht geltend erscheint die Voraussetzung nur dann, wenn die zur Beschleunigung nötige Energie bereits in der zu beschleunigenden Masse enthalten ist, so bei Beschleunigung elektrischer Kraftfelder durch das Drängen ihrer Kraftlinien und besonders auch bei Beschleunigung durch Gravitation, wo kein äußerer Energieverbrauch nachgewiesen ist; in diesen Fällen ist demnach die Masse als unverändert, als geschwindigkeitsunabhängig zu betrachten (vgl. 481, wo einzelne Fälle aufgezählt und die Hinweise auf deren besondere Betrachtung gegeben sind).

b) Kinetische Energie $\mathfrak{E}_k$ einer Masse m, deren Geschwindigkeit v ist (zu M 146 und E 480, 589).

Kinetische Energie — Energie der Bewegung — ist ihrer Bedeutung nach (M 145) stets diejenige Energie, welche eine bewegte Masse infolge ihrer Bewegung besitzt. Dies ist die Definition (Begriffsbestimmung) der kinetischen Energie. Kommt die Masse zur Ruhe, so gibt sie ihre kinetische Energie ab. Dadurch ist für alle Fälle die Menge der kinetischen Energie festgehalten: sie ist diejenige Energiemenge, welche der Masse entzogen werden muß, um sie zur Ruhe zu bringen. Dies ist die definitionsgemäße Er-

mittelungsweise der kinetischen Energie. Da bei dieser Energieentziehung die Masse entsprechend kleiner wird, sieht man, daß die kinetische Energie für alle Fälle mit veränderlicher Masse zu berechnen ist. Diese Energieentziehung ist die Umkehrung der unter a berechneten Energieaufnahme, und da die Masse der aufgenommenen Energie als $m - m_0$ nach a bereits bekannt ist, ist auch die Energie selber bekannt, sie ist nach Hasenöhrls Gedankenversuch (434) $(m - m_0)c^2$, und dies ist also die gesuchte kinetische Energie $\mathfrak{E}_k$. Es gilt daher für alle Fälle

$$\mathfrak{E}_k = (m - m_0)c^2 = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1\right) = mc^2\left(1 - \sqrt{1 - v^2/c^2}\right), \quad b)$$

oder in Reihenentwickelung

$$\mathfrak{E}_k = \frac{1}{2} m_0 v^2 \left(1 + \frac{3}{4}\frac{v^2}{c^2} + \frac{3 \cdot 5}{4 \cdot 6}\frac{v^4}{c^4} + \frac{3 \cdot 5 \cdot 7}{4 \cdot 6 \cdot 8}\frac{v^6}{c^6} + \ldots\right)$$

$$= \frac{1}{2} m v^2 \left(1 + \frac{1}{4}\frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{4 \cdot 6}\frac{v^4}{c^4} + \frac{3 \cdot 5}{4 \cdot 6 \cdot 8}\frac{v^6}{c^6} + \ldots\ldots\right).$$

Man sieht hier, daß die gewöhnliche Angabe $\mathfrak{E}_k = m_0v^2/2$ oder $mv^2/2$ genügend genau gilt, sobald v nicht sehr groß (v^2/c^2 klein gegen 1) ist. Wir haben die Beschränkung von $mv^2/2$ auf unveränderliche Masse, d. i. im allgemeinen kleine Geschwindigkeiten, bereits bei der Herleitung dieser Angabe angemerkt (M 146). Es ist stets festzuhalten, daß $mv^2/2$ nicht Definition der kinetischen Energie, sondern nur Rechenformel für nicht zu große Geschwindigkeiten ist.

Kinetische Energie ist, wie Geschwindigkeit, stets relativ (589).

Die Energie elektrischer Wellen ist rein kinetisch, $\mathfrak{E}_k = mc^2$; Ruhenergie und Ruhmasse ist hier nicht vorhanden, $m_0 = 0$ (590). Dies stimmt mit den vorhergehenden Gleichungen, wenn $v = c$ ist, wie es sein muß.

c) Kinetische Energie eines Elektrons und ihr Voltmaß (zu 462).

Für ein Elektron ist die kinetische Energie $\mathfrak{E}_k$ auch gegeben durch $V \cdot e$, das Produkt aus der Spannung V, bei deren Durchlaufung die Energie ans Elektron kam, und seiner Elektrizitätsmenge e. Es ist also nach b

$$Ve = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1\right) \text{ und daher}$$

$$V = \frac{m_0}{e}c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1\right).$$

Dies ist der Zusammenhang zwischen dem Spannungsmaß V und dem Linearmaß v der Elektronengeschwindigkeit. Die Einheiten sind hier CGS-elektrostatisch.

Für V in Volt und v in Bruchteilen der Lichtgeschwindigkeit c wird (vgl. die willkürlichen Faktoren in Tab. 50)

$$V = 511000\left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2}} - 1\right),$$

wonach die Tab. 53 berechnet ist.

Will man die kinetische Energie eines Elektrons, Ve, in erg, so ist — wieder mit Berücksichtigung der Einheitsfaktoren — für je 1 Volt $1{\cdot}59 \cdot 10^{-12}$ erg zu rechnen.

Anhang E VII (zu 447 und 491). Strahlabsorption.

Wenn jede kleine Schichtdicke dx den gleichen Bruchteil dI/I der Intensität I absorbiert, so ist

$$dI/I = -a \cdot dx , \qquad 1)$$

wo a eine positive, die Stärke der Absorption bemessende Konstante ist („Absorptionsvermögen" des Stoffes, bzw. „Absorbierbarkeit" der Strahlung).

Dies einfache Verhalten gilt für alle Strahlabsorption (von Licht, Schall, Kathodenstrahlen usw.), sofern die Strahlung bei der Absorption ungeänderte Absorbierbarkeit beibehält. Es gilt somit die Differentialgleichung $dI/dx = -aI$. Ihr Integral ist

$$I = I_0 e^{-ax} , \qquad 2)$$

wo I_0 ersichtlicherweise der Wert von I bei $x = 0$ ist (vgl. das mathematisch gleiche Problem im Anhang III zur Mechanik).

Bei Kathodenstrahlen nimmt die Absorbierbarkeit a während der Absorption zu, weil Geschwindigkeitsverluste eintreten (488, 489); man kann nur für kleine Dicken mit konstantem a nach Gl. 2 rechnen.

Das Absorptionsvermögen a bedeutet auch die absorbierende Querschnittsumme der Volumeinheit des absorbierenden Stoffes. Jedes Atom (Molekül) des Stoffes setzt der Strahlung eine gewisse Fläche absorbierend entgegen — seinen absorbierenden Querschnitt —, während der Rest der von der Strahlung durchsetzten Fläche durchlässig ist, und die Summe aller dieser absorbierenden Querschnitte der in der Volumeinheit enthaltenen Atome (Moleküle) ist a. Denn es muß das Verhältnis vom absorbierten Teil dI zur gesamten Intensität I gleich sein dem Verhältnis vom absorbierenden Querschnitt zum Gesamtquerschnitt der absorbierenden Schicht von der Dicke dx. Da aber I stets auf die Flächeneinheit sich bezieht, so ist der gesamte betrachtete Querschnitt gleich der Flächeneinheit, und $a \cdot dx$ muß somit nach Gl. 1 der absorbierende Querschnitt des Volums der dünnen Schicht dx von Flächeneinheitsgröße sein. Danach ist a die Querschnittssumme der Volumeinheit, was zu beweisen war. Man kann hierbei dx als Dicke einer einzelnen Atom- (Molekül-)-Schicht gelten lassen.

Voraussetzung dieser Darstellung der Absorption durch Wirkung absorbierender Querschnitte ist von einander unabhängige Wirksamkeit dieser Querschnitte; die tatsächliche Geltung des Absorptionsgesetzes Gl. 2 beweist das Zutreffen der Voraussetzung.

Prof. Dr. A. Becker war so gütig, sämtliche Korrektur-Abzüge der ersten Auflage des Werkes durchzusehen; ich möchte ihm für wertvolle Bemerkungen danken, die dem Text noch zugute kamen.

Die Reichhaltigkeit des nachfolgenden Verzeichnisses, das jeden Benutzer leicht ins Innere des Werkes führt, ist Fräulein Dr. Ilsemarie Schaper's sachkundiger Bemühung zu danken. Alle in den Neuauflagen hinzugekommenen Gegenstände sind eingefügt worden.

Für alle Sorge um die gelungene Druck- und Abbildungs-Ausstattung des Werkes werden die Leser gewiß, gleich mir, dem Verlag Dank wissen. P. L.

Verzeichnis der behandelten Gegenstände.

Nachschlageverzeichnis zum Gesamtwerk

mit Bandzahlen (römisch) und Seitenzahlen.

Die römischen Ziffern I—IV verweisen auf die Bände, die arabischen geben die Seitenzahlen an.

Aberration I 137; III 17f.
— sphärische s. Kugelfehler.
— chromatische s. Farbfehler.
abgeleitete Einheit I 22; IV 43f.
Abklingung beim radioaktiven Zerfall IV 245f.
Abkühlung der Erde II 167.
Ablenkungsminimum II 33.
Abreißmethode s. Oberflächenspannungsmessung I 183.
Absolutbewegung I 38, 135; II 65; III 19.
absolute Temperatur II 104.
absolutes Einheitssystem I 103; IV 22f.
absorbierende Querschnitte bei Kathodenstrahlen IV 202, 292.
— — — Licht III 127.
absorbiertes Licht, Energieverbleib III 71f.
Absorption von α, β, γ-Strahlen IV 241.
— — Gasen I 32.
— — Hochfrequenzstrahlen IV 208f.
— — Kathodenstrahlen IV 170f., 201f., 292f.
— — Licht III 58, 64f., 78, IV 292f.
— — — Energiebeziehung III 63, 127.
— — — erregende III 82.
— — — Folge des Mitschwingens II 180; III 65; IV 152.
— — — selektive III 41, 64.
— — Schall II 30.
— — Wellenstrahlen (aller Art) II 60.
— und Emission II 180, 181; III 67f.
Absorptions-Banden, Linien, Spektren III 64f.
—spektralanalyse III 65.
—vermögen eines Körpers II 181, 182.
— — eines Stoffes IV 291.
Abstandsgesetze I 111; II 25; III 12; IV 35.
Abstandsgesetze für elektrische und magnetische Kräfte IV 72, 147.
Abstoßung, elektrische III 157.
—skräfte der Moleküle I 140.
Abreißen von Flüssigkeit I 183.
Achse, optische III 136f.
Achsen, freie I 122, 123, 129.
—winkel III 141.
achromatische Linsen III 57.
— Prismen III 56.
Actio und Reactio s. Kraft und Gegenkraft.
adiabatisch, Definition II 243.
—e Zustandsänderung II 121, 259, 260.
Addition, geometrische I 37,38.
Aequinoktien s. Tag- u. Nachtgleichen.
Aequipotentialfläche s. Fläche gleicher Spannung.
aequivalente Mengen III 254f.
Aerodynamik s. Bewegungserscheinungen in Gasen.
— Grundgleichungen I 219, 240.
— Gültigkeitsgrenzen I 236.
Aerostatik s. Gleichgewicht bei Gasen.
Äther I 4, 17, 23, 159, 247; III 3f., 6f., 16f., 103f.; IV 267f.
— als gasförmiger, flüssiger, fester Körper I 244; III 4f., 218; IV 284.
— — Träger des Lichtes und der Kraftlinien IV 143f.
— an Erdoberfläche ruhend III 106f.; IV 50.
— Definition III 6.
— der kleinen Körper III 17, 103f., IV 130.
— des Ortes III 17.
— Existenzbeweis III 4.
— Gefälle IV 263.
— Gravitation, Energie IV 259f.
— nicht einheitlich III 16, 20.
— und Drehbewegung III 109.
— — elektrische Kräfte III 155, 185f., 217f.
Äther und Elektrizitätsbewegung IV 50.
— — Energie I 87; III 219; IV 262.
— — Geisterwelt IV 268f.
— — Induktion IV 86, 129f.
— — Kraftlinienbewegungen IV 76, 86.
— — Lichtgeschwindigkeit III 16, 103f.
— — Materie I 4; III 7.
—welle III 6.
—wellenskale II 174; III 67; IV 153.
Aggregatzustände I 17, 29, 141f.
—zustandsänderungen II 201f., 245.
Akkommodation III 50.
Akkord s. Zusammenklänge.
Akkumulator III 277f.
Aktiniumreihe IV 248.
aktiver Niederschlag IV 246.
Aktivität IV 239.
— induzierte IV 246.
Akustik II, s. auch Raumakustik.
Alkalimetalle, lichtelektr. Verhalten IV 185, 189.
— Serien, spektrale III 62.
Allzusammenhang in der Natur I XII, 11.
Alpha-Partikel, -Strahlen IV 220, 222, 231f., 240f., 256.
Alter der Erdrinde II 168; IV 249.
Aluminiumfenster IV 165f.
amorph I 141.
Ampère, Definition IV 46.
— Namengebung III 291.
—meter III 235f.
—windungszahl s. Weberwindungszahl.
—s Theorie des Magnetismus IV 57.
Amplitude, Schwingungsweite I 91, 93, 94, 241.
— lineare, und Druck- II 255.
— reflektierter u. gebrochener Lichtwellen III 133.
Amplitude und Energie II 32, 255; III 126, 214.

Analysator III 131f., 137f.
Analyse, chemische durch Luftleitung IV 247.
— — — Spektralbeobachtung III 59.
Aneroid I 197.
Angriffsfläche I 228.
Angriffspunkt I 48, 57.
— von Kraft und Gegenkraft I 114f.; IV 71, 160.
Angströmeinheit IV 207.
Anion III 251.
anisotrope Körper I 143; II 166; III 134.
Anker IV 31, 59, 61, 108.
Anlaßwiderstand IV 110.
Anlauffarben III 92.
Anode III 246; IV 163.
—nstrahlen IV 225.
anomale Dispersion III 40, 67.
Ansprechen der Entladungsröhre IV 218.
Antikathode IV 208f.
Antenne IV 155, 192.
Anziehung, elektrische III 155, 165f.
— der Moleküle I 138, bei Gasen I 201f.; II 152, 234.
aperiodische Schwingung I 242, IV 276.
Aräometer I 172.
Arbeit I 54, 80; II 125.
— durch Druck bei Volumänderung I 215.
— — Strahlungsdruck IV 155f.
— Einheit I 54, 103; IV 25.
— elektrische III 170, 280; IV 100.
— mechanische, aus chemischer Energie II 161, 244.
— Messung durch Reibung I 163.
— und Wärme II 92, 243.
— virtuelle I 55.
— von Kräften gegen Kräfte und gegen Trägheit I 83.
Arbeits-äquivalent der Wärme II 127, 129.
—ersparnis I 55.
—gewinn bei Motoren s. Wirkungsgrad.
—übertragung, elektrische IV 110.
—vorrat s. Energieformen.
Arbeitswert von Nahrungsmitteln II 159.
Archimedes' Satz I 170.
artesische Brunnen II 97.
Artgewicht s. spezif. Gewicht.
astatisch, Astasiermagnet IV 30, 49.
Asymmetrietöne II 62, 73, 74.
Atmosphäre, Druck, Druckverteilung I 196, 203, 242; II 136.
— Druckeinheit I 148, 196.
— Elektrizität III 200, 224.
— Höhe I 204.
— Leitfähigkeit IV 213, 258.
— Temperaturverteilung II 136, 178, 261.
Atmosphären der Himmelskörper II 136.
Atmung und Staub II 145.
Atome I 23—31; IV 225f.
— als Elektrizitätsquellen III 189; IV 228.
— — elektrische Oszillatoren und Resonatoren III 60, 68f., 81; IV 152, 228.
— Bindungen und Magnetismus IV 65.
— chemische Energie und Gesamtenergie III 275f.
— Durchquerung IV 168, 199f.
— Eigenperioden III 60, 65f., 81; IV 210.
— Eigenraum II 137—143, s. auch Undurchdringlichkeit.
— Einheitlichkeit ihrer Grundbestandteile I 73; IV 172, 228.
— Elektronenfesthaltung s. Spannungsreihe.
— Energievorrat IV 259f.
— Grundkenntnisse IV 226 bis 232.
— gruppenweises Wirken III 127.
— Inneres III 62, 80; IV 169, 185, 204, 226f.
— — an Wärmebewegung nicht beteiligt II 151.
— — Erfahrung, noch verfügbare IV 236f.
— — lose Raumerfüllung IV 197—203, 229.
— — Rechnungen über IV 235.
— Neubildung durch Druck I 169.
— Ordnungszahl I 27.
Atome, quantenhaftes Arbeiten II 191f., 271; III 72, 80, 127; IV 187, 199f., 208f.
— Querschnitt, absorbierender, Wirkungsquerschnitt IV 202f., 292.
— — gaskinetischer IV 203.
— Umwandlung in Wellen IV 261.
— und bewegte Elektronen IV 198f.
— — Lichtwelle III 127.
— — Magnetismus IV 8, 19, 20, 57, 62f.
— Undurchdringlichkeit, gegenseitige I 23, 31, 148, 169.
Atom-bilder IV 233f.
—durchmesser I 29; II 142 bis 144.
—gewichte I 26, 27; II 132, 154f.
— — absolute II 142—144; III 260; IV 224f.
—kerne IV 231f., 243.
—kräfte I 138, 141, 157.
—modelle s. Atombilder.
—optik III 58f.
—strahlen II 135, IV 238.
—tabelle I 28; IV 252, 253; s. dazu auch III 257.
—umwandlungen IV 254f.
—wärme II 116, 117, 152, 153.
—zahl im Molekül und spezif. Wärme II 122.
—zählung IV 240.
—zerfall IV 242f.
Auftrieb I 170, 173, 198.
Aufspaltung der Spektrallinien IV 238.
Aufspeicherung bei Phosphoren III 84.
Auge III 10, 49, 77.
— Farbeneigentümlichkeiten III 40.
Augen der Lebewesen II 196.
—linse s. Okularlinse.
Ausbreitung der Wärme II 162f.
— — — durch Strömung II 97f., 106f.
— von Flüssigkeit I 183f.
— — Spannung und Strom an Leitung III 215f., IV 285.

Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen s. Fortpflanzungsgeschwindigkeit.
—smechanismus von Wellen II 10f.
Ausdehnbarkeit I 31.
Ausdehnung, Raumerfüllung I 17f.
— durch Wärme II 89f., scheinbare II 93.
—sarbeit bei festen Körpern II 91, 152.
— — innere und äußere bei Gasen II 151, 152.
—skoeffizient, linearer II 89, 90.
— — kubischer II 93, 95.
— — wahrer II 94.
— — von Gasen II 99f.
Ausflußgeschwindigkeit, Ausflußsatz I 208f., 216f.; II 135.
Ausleuchtung der Phosphore III 86f.
Auslösung I 84, 159.
Aussendung s. Emission.
Ausstrahler s. Antenne.
Ausweichung, Elongation II 8.
Außenelektronen, -dynamiden IV 234f.
außerordentlicher Strahl, Definition III 136.
Avogadros Satz II 132.
Axialität der Lichtemission IV 226.

Ballistisches Galvanometer IV 51, 273f.
Banden der Absorption III 64.
— — Phosphore III 81 f.
Bandgenerator III 168.
Barometer I 196, 197.
Bäuche und Knoten der Bewegung, des Druckes II 57.
— — — elektrischer u. magnetischer Kraft IV 137f., 141 f.
Becquerelstrahlen IV 208.
Begreifen I 5, 12; IV 267.
Begriffe und Gesetze I 9.
Beharrungsvermögen I 41f.
Beleuchtungsmittel II 194f.
—stärke III 11f.
Benetzung I 187, 189.
Beobachtung und Versuch I 5.
Berührungsspannung III 221f.
Beschleunigung I 39f.
— gleichförmige I 75.
Beschleunigung, stets relativ I 40.
— von Elektronen IV 180f., 192f., 289f.
Beschleunigungseinheit I 40; IV 24.
—srichtung I 69.
Beta-Strahlen IV 241 f.
Beugung II 24,53; III 13,108f.
— Beobachtungsweisen, Berechnungsweise III 113f.
— am Gitter III 115, 119f.
— an 2 Öffnungen III 114f.
— um Schirmkante III 112f.
Beugungs-erscheinungen an Geweben III 122.
—spektren III 115, 117f.
—streifen, Winkelabstände III 116.
Beweglichkeit I 32f.
Bewegung, beharrende I 209, 216.
— drehende u. fortschreitende I 97f., 101.
— gleichförmige I 34.
— Grundgesetz I 68f.
— in Flüssigkeiten und Gasen durch Wärme II 97f., 106f.
— innerhalb des Atoms IV 230f.
— innermolekulare II 101, 150, 151, 153.
— krummlinige I 104f.
— nichtstationäre, veränderliche I 216f.
— schwingende I 90f.
— stationäre, s. beharrende.
— tumultuarische, wirbelnde I 224.
— ungleichförmige I 39.
— von Elektronen IV 192f., 289f.
Bewegungs-energie I 82.
—erscheinungen in Flüssigkeiten und in Gasen I 204f.
—gesetze Newtons I 47, 69f., 114.
—größe, Definition I 69.
— — Erhaltung I 121, 128.
—lehre, allgemeine I 68f.
— — reine I 34.
—widerstand in Flüssigkeiten und Gasen I 232f.
—wirkungen bei Schall (Quelle und Beobachter) II 63, 64.
Beweise, exakte, der Naturgesetze I 10.
Bezugsmäßigkeit der Beschleunigung I 40.
— der Geschwindigkeit I 36.
— — kinetischen Energie IV 265.
Biegung I 143, 146.
bifilare Aufhängung IV 75.
— Wickelung IV 96.
Bild, elektrisches III 200.
— (optisches), Definition III 10f.
— reelles und virtuelles III 11, s. auch Linsenbilder, Spiegelbilder.
—telegraphie IV 186.
—weite s. Linsen.
Bilder, Begriffe I 7.
Bindung, chemische I 26; III 250f., 256f.
— gegenseitige, von Elektrizität III 158.
Bindungswert s. Valenz.
binokulares Fernrohr III 51.
Biot-Savart'sches Gesetz, siehe Stromelementengesetz.
Blattgrün III 73.
Blei als Endprodukt der Atomzerfallsreihen IV 247f.
—gruppe IV 254.
Bleichwirkung des Lichtes III 72.
Blitz III 169.
—ableiter III 182.
—schlag III 180.
—schutz III 176.
Börsianer-Optik IV 236.
Bogen, elektrischer II 194f.; III 59, 63, 281f.; IV 218f.
Bohr'sches Atommodell siehe Atome, Inneres, Rechnungen über
Bolometer II 108, 176; III 246.
Boltzmanns Gleichung II 270.
Bombardon II 81.
Boyle-Mariottesches Gesetz I 198f.; II 105, 214.
— — Gültigkeitsgrenze I 200f.
Brandung II 19.
Brechung der Wärmestrahlen II 173.
— des Lichtes III 26f.
— — — Erklärung III 29f.
— einer Welle III 32.
— elektrischer Wellen IV 151.
— im Prisma III 33.

Brechung in Kristallen III 134f.
— — Linsen III 43.
— und Farbe III 35f.
— und Mitführung III 105.
— und Polarisation III 131f.
Brechungs-exponent III 26f., 66f.; IV 151, 282.
— — Ermittlung III 28, 34.
— — für Hochfrequenzstrahlen III 66f.; IV 206.
— — von Kristallen III 137, 141.
— — und Geschwindigkeit III 32, 39.
— — von Metallen III 68.
—gesetz III 26.
—winkel III 26.
Bremsdynamometer I 163.
Bremsstrahlung s. Hochfrequenzstrahlen, Spektrum.
Brennpunkt III 24, 46f.
Brennweite III 46f.
Brownsche Molekularbewegung s. Kleinwimmel.
Brunnen, artesische II 97.
Bügelmessung d. Oberflächenspannung I 183.
Bugwelle II 14.
Bunsen-Elemente III 277.
—flamme III 59, 63.
—s Eiskalorimeter II 115.
—s Gasdichtebestimmung s. Ausflußgeschwindigkeit von Gasen.
Buntdruck III 43.

Chemie I 3.
chemische Analyse durch Luftleitung IV 247.
— — — Spektralbeobachtung III 59f.
— Eigenschaften und radioaktiver Zerfall IV 250f.
— Energie II 155f.
— — ist elektrische Energie III 274.
— — Teil der Gesamtenergie der Atome III 273f.
— — Ursprung der Stromenergie von Elementen III 231f., 272f.
— — Verwandlung in mechanische Arbeit II 161, 244.
— Formeln I 26; III 257.
— Kräfte I 138; III 251f., 268, 272; IV 227, 235f.
chemische Kräfte und Molekularkräfte I 141; III 258.
— Verbindung I 26.
— Wertigkeit I 141; III 251f., 253—256; IV 251f., 254.
— Wirkungen des elektrischen Stromes III 246f.
— — des Lichtes III 71f., 252; IV 154.
— Zersetzung durch Wärme II 154.
chemisches Reaktionsleuchten II 195.
Chlorknallgas III 76.
Chorophyll s. Blattgrün.
chromatische Aberration siehe Farbfehler.
CGS-System IV 23f., 184.
Clark-Element III 276; IV 95.
Clausius' Gedankenversuch II 241.
cm als Kapazitätseinheit III 179.
— — Längeneinheit im irdischen und im absoluten System I 44; IV 23.
Compton-Effekt III 80, 127, IV 189.
Coulomb, Mengeneinheit der Elektrizität III 163; IV 47f.
— und Stromeinheit III 232.
Coulombs elektr. Gesetz III 161f.
— — — besonderer Nachweis III 175.
— — — Gültigkeitsgrenzen III 163, 206; IV 147.
— — — innerhalb des Atoms IV 231f.
— — — Schwierigkeit der Anwendung III 182, 191.
— magn. Gesetz IV 5f.
— — — Nachprüfung IV 28.
— — — nicht ausreichend IV 8f.
— — — und Pole IV 6f., 25f.
— Gesetze als Grundlage der elektrischen Maßsysteme IV 25f.
Curiepunkt s. Permeabilität und Temperatur.

Dämmerungserscheinungen I 204.
Dämpfung durch Reibung I 230, 241.
— magnetische IV 105f.
Daltons Gesetz s. Gay-Lussac-Dalton.
Dampf II 207, 213.
— gesättigter II 208, 213, 215.
— überhitzter II 214.
— übersättigter (unterkühlter) II 227.
— ungesättigter II 213, 215.
— und Gas II 211f.
—dichte und Molekulargewicht II 132.
—kalorimeter II 114f.
—kondensation an Kernen II 226f.
— — — Trägern II 228; IV 222.
—maschine I 215; II 129, 237f.
—moleküle II 133, 217, 230.
—spannung II 207—218, 245.
— — an gekrümmten Flüssigkeitsoberflächen II 228, 229.
— — im gaserfüllten Raum II 216.
— — von Lösungen II 217, 222.
—spannungs-erniedrigung II 204, 222.
— —tabelle II 211f., 232.
—strahl II 227.
—turbine I 214.
Daniell-Element III 276f.
Dauerzentren, Dauerzustand der Phosphore III 81, 83.
Dehnung I 143, 145, 148, 150.
Deklination IV 21.
Denken mit der Natur I XIII.
d-Erregungsstellen der Phosphore III 82f.
Destillation II 214.
Deuterium s. Wasserstoff, schwerer.
Deuteronenstrahlen IV 256.
Diamagnetismus IV 62f., 66.
— Webers Theorie IV 89f.
Diamant II 116, 117f.; III 29.
Dichte I 45, 72.
— der Himmelskörper I 118; II 200.
Dielektrikum III 204f.
dielektrische Polarisation, Verschiebung III 164f., 208f.
Dielektrizitätskonstante III 165f., 204f., 209; IV 125, 144f., 151.
— und Brechungsexponent IV 151, 282.
Differential I 39.

Differentialquotient I 39, 41.
—thermometer II 176.
Differenztöne II 74.
diffuses Licht III 25.
Diffusion I 176, 205f., 237; II 138, 141, 145.
— der Kathodenstrahlen IV 167f., 172, 198f., 203f.
— — — geordnete IV 169, 199f.
— Gastrennung durch, I 207, II 145.
—sluftpumpe I 207, 232.
Dimensionen IV 44f.
Dipol s. Doppelpunkt.
Direktionskraft I 92, 102.
Dispersion s. auch Farbenzerstreuung.
— anomale III 40, 67.
— Rotations- III 149.
— Theorie III 65f.
Dissonanz II 37, 49, 51.
Dissoziation, elektrolytische III 252, 266f.
— thermische II 154; III 253, 266f.
—sgrad III 265f.
Doppelbrechung III 134f.
— Einzelfälle III 141.
— Erklärung III 138f.
— elektrische IV 91.
— in nichtkristallisierten Körpern III 149.
— macht Gangunterschied III 142.
— und Polarisation III 135f.
Doppel-drahtleitung IV 41, 88.
—linien (spektrale) III 63; IV 224.
—punkt, elektrischer III 208f.
—schicht, elektrische III 222f., 268, 271.
— — magnetische IV 56.
—sterne, -sonnen I 122; III 18f., 117f.
— — spektroskopische II 66.
— T-Anker IV 62.
Dopplers Prinzip II 63f.
Drahtwellen, elektromagnetische III 195; IV 136f.
Drehbewegung I 56, 59, 97f.
— absolut erkennbar I 135; III 20.
— Begriffe I 98.
— einfache Behandlung I 100.
— in Flüssigkeiten I 224f.
— und Äther III 109.
Drehbewegung, Zusammensetzung I 131.
Drehbewegungsgröße I 101, 127.
Drehfeld, magnetisches IV 120f.
Drehkräfte von Atomen und Molekülen I 140.
Drehmoment I 58f., 99, 126, 127, 128.
— dynamische Messung IV 28.
Drehschwingung I 101.
Drehspiegel zur Messung kurzer Zeiten III 15, 167; IV 124, 132, 143.
Drehspulgalvanometer IV 69, 106.
Drehstrommotor IV 120.
Drehung der Elementarmagnete IV 7f., 19, 57.
— der Polarisationsebene III 147f.
— — — im Magnetfeld III 150; IV 30, 90f.
Drehwaage I 150; III 161f.; IV 6.
Drei-dimensionalität des Raumes I 17.
—klang II 39.
—körperproblem I 117.
—phasenstrom IV 120.
Drillung I 143, 149, 150.
Drillwelle II 254.
Drillwinkel I 150.
Drosselspule IV 117f., 191.
Druck, Definition I 144.
— durch Schwere I 166—169.
— eines Gases I 195, 198, 200; II 102, 103.
— elektrischer III 180, 197, 206.
— elektromagnetischer Wellen IV 155f.
— gekrümmter Flüssigkeitsoberflächen I 182.
— hoher I 165, 169.
— in Flüssigkeit I 164, 165.
— — Himmelskörpern I 168.
— innerer I 178, 191, 201, 208.
— kritischer II 232.
— osmotischer I 207, 208; II 134, 204.
— und Energiedichte I 212f.
— — Volum eines Gases I 198f.
— von Schallwellen II 62.
Druck-abhängigkeit d. Schmelzpunktes II 205—207.
Druck-abhängigkeit des Siedepunktes II 219f.
—arbeit I 215.
—einheit: Atmosphäre I 148, 196.
—gefälle beim Fließen I 217f.
—messung I 195.
—probe bei Dampfkesseln I 215.
—verteilung in festen Körpern I 147.
— — in Atmosphäre I 203.
Duktil I 152.
Dunkelfeldbeleuchtung III 54.
Duodezime II 41.
Durchquerung von Atomen durch Elektronen IV 168, 198f.
Durchschlagsfestigkeit III 210.
Dur und Moll II 37.
dyn, Krafteinheit I 103; IV 24, 45.
Dynamide IV 229—236.
Dynamik s. Bewegungslehre, allgemeine.
dynamische Spannungsmessung III 243f.
dynamisches Gleichgewicht II 209.
Dynamo-Maschine IV 107f., 121.
—meter s. Elektrodynamometer.

Ebbe und Flut I 123, 124.
Ebene, schiefe I 50—52, 54, 161.
Echo II 25.
—lot II 30.
Einatomigkeit II 151, 153.
Einfall, streifender III 28.
Einfallslot, Einfallswinkel III 22.
Einheiten, abgeleitete und Grundeinheiten I 22.
— Definition I 19.
— elektrische, technische IV 45f.
— elektromagnetische, absolute IV 24f., 43f., 93f.
— elektrostatische, absolute IV 25f.
— und Naturgesetze I 22.
— Verhältnis, elektrostatisch zu elektromagnetisch IV 51, 144, 278.
Einheits-kreis I 66, 98.
—pol, magnetischer IV 12, 25f.

Einheitssystem, absolutes I 103; IV 22f., 45.
— — verbessertes, Grundeinheiten IV 184.
— irdisches oder technisches I 44.
— mit 2 Grundeinheiten I 118.
Eintauchtiefe I 172.
Eis, klimatisch wichtiges Verhalten II 205.
— Regelation II 206, 207.
Eis-kalorimeter II 115.
—maschine II 225.
—schmelzpunkt als Temperaturfixpunkt II 203.
Eiszeit II 197.
Eisen, weiches, magnetisches Verhalten IV 4, 6f., 14f., 19f., 22, 58, 65.
—feile zur Kraftlinienabbildung IV 10f.
—kreis IV 60f.
Ellipsenschiefe I 134.
Elastische Konstanten I 144 bis 146, 151.
— Kräfte fester Körper I 142f.
— Längswelle an einem Stab II 12, 74f., 252.
— — in festen Körpern II 16f., 253.
— Wellen II 11f.
Elastizitäts-grenze I 142, 151, 152.
—modul I 144, 145.
—theorie I 146, 150, 247.
elektrische Anziehung und Abstoßung III 155.
—s Bild III 200.
— Einheiten, absolute IV 25f.
— — technische IV 45f.
— Elementarquanten s. Elementarquanten.
— Energie III 211f.
— Entladung in Gasen III 169; IV 162f., 210f.
—s Feld III 185f.
— — Energieinhalt III 214f.
— Koppelung IV 136.
— Kraft III 184f.
— — Nachweis durch verdünnte Gase IV 128.
— — veränderliche, Magnetfeld derselben IV 131.
— — keine Fernkraft IV 147.
— Kraftlinien s. Kraftlinien.
— Leistung III 280.
elektrisches Leitvermögen II 165; III 237f.
— Schwingungen IV 122f., 192, 275f.
— Spannung s. Spannung.
—r Strom und Flüssigkeitsstrom III 236, 237; IV 101f.
— Wellen IV 134f., 281f.
— — Anwendungen, technische IV 154.
— — Ausbreitung IV 134, 141f.
— — Brechung IV 151.
— — Druck IV 155f.
— — Huygens' Prinzip IV 142.
— — längs Drähten IV 136f.
— — Lichtwellen IV 52, 151f.
— — Polarisation IV 150.
— Wirkungen des Lichtes III 71f.; IV 184f.
Elektrizität an sich IV 178.
— aus Atomen III 189; IV 228.
— fließt III 227f.
— freie III 159.
— Grundkenntnisse III 155f.
— in Unmengen in den Körpern III 159.
— nicht erzeugt III 159f.
— paarweise vorhanden III 189.
— positive und negative III 158, 161.
— ruhende III 155f.
— und Licht, Zusammenhang IV 143.
— — Magnetismus, Zusammenhang IV 33f., s. auch elektrodynamischer Zusammenhang.
Elektrizitäts-austausch an Elektroden III 266.
—bewegung und Äther IV 50.
— — Unbestimmtheit III 160.
—gewinnung und Arbeitsleistung III 167f.
—leitung in Elektrolyten III 254.
— — — Flammen IV 214f.
— — — Gasen IV 210f.
— — — — und Flüssigkeiten IV 221f.
— — im Magnetfeld IV 67f.
— — in Metallen III 161, 194; IV 216f.
Elektrizitäts-menge, Einheiten III 163; IV 25, 45—48.
— — Messung mit Galvanometer IV 51, 273.
— — und Kraftlinienzahl III 205.
— — — Spannung III 172, 178f.
—mengen, alle aus Elementarquanten III 258f.
— — als Kraftlinienenden III 195f.
—träger s. Träger.
—zähler IV 106.
Elektrode III 246f.
Elektrodynamik III 220f.; IV 33f.
— bewegter und ruhender Körper IV 130, 280.
Elektrodynamischer Zusammenhang IV 76f., 84, 128f. 278f.
Elektrodynamometer IV 75.
Elektrolyse III 246f.
— chemische Anwendung III 248.
— Gesetze von Faraday III 247, 254.
— in Gasen IV 222.
— und Elementarquant III 258f.
Elektrolyt III 246.
— Leitvermögen III 262f.
— Stromdurchgang III 254f.
elektrolytische Dissoziation III 252.
— Polarisation III 268f.
Elektromagnete IV 53f., 58f.
elektromagnetisches Feld, Entwickelung IV 103.
— — und Masse IV 103.
Elektromagnetische Felder im Atominneren IV 169, 237.
— — um Atome IV 203.
— Ohmgleichung IV 54.
— Telegraphie IV 59.
— Wellen s. elektrische Wellen.
Elektrometer, Eichung III 173.
— Quadrant- III, 173.
— absolutes III 201.
— heterostatische III 173.
— idiostatische III 173.
Elektromotor IV 60f., 105f. 109, 120f.
Elektromotorische Kraft III 235.

Elektromotorische Kraft der Induktion IV 85f.
— — der Selbstinduktion IV 99
— — und Energiegesetz III 273f.
— Wirkung bei Berührung III 222f.
Elektron III 258f.; IV 178f., s. auch Elementarquanten.
— Kraftfeld III 189; IV 57, 182f., 196f.
— — Änderung bei Beschleunigung IV 193f.
— Ladung III 259f.; IV 180.
— Masse IV 180.
— Massenveränderlichkeit IV 183, 194f., 289f.
— räumliche Abmessung IV 198f., 229f.
— Ruhmasse IV 194, 198.
— Umwandlung in Welle IV 261.
— und Energie IV 196f.
Elektronen, Befreiung durch Nähewirkung IV 216f.
— — — Resonanz IV 187, 213.
— — — Sekundärstrahlung IV 204.
— Bestandteile der Atome IV 184f., 204.
— Drall s. — Kreiselung.
— freie, in Flammen IV 214f., 216.
— — in kalten Gasen IV 217.
— glühelektrische IV 190.
— Kreiselung IV 57f., 231.
— langsame IV 190f.
— lichtelektrische IV 185—189.
— Mikroskop IV 174.
— schnellste IV 193f.
— sichtbare Wege IV 222.
— und Atome, Zusammenwirken IV 199f.
— — — bei metallischer Stromleitung III 161; IV 68, 217.
— Valenz- III 251f.; IV 65, 188, 235, 254.
— Verschiebung III 85.
— „Wellen" IV 169f.
— Zählung IV 241.
Elektrophor III 166.
elektropositiv, elektronegativ III 226, 252, 257.
Elektroskope III 157f., 168f.
— Eichung III 172f.
Elektroskope als Spannungsanzeiger III 168.
Elektrostatik III 155f.
elektrostatischer Schutz III 165, 175f., 201.
—e Spannungseinheit III 172.
Elementar-magnete IV 7f., 13, 19f., 57, 65f.
—quanten, elektrische II 143; III 155, 189, 258f.; IV 178, 229f.
— — — Entwicklungsherde d. Magnetfelder IV 76, 103f.
— — — Größenberechnung III 259f.
Elemente, chemische I 25, 29; IV 226, s. auch Atomtabelle.
— — Eigenschaftsänderung beim Zerfall IV 250f.
— — isotope IV 224f., 254f.
— — Nachweis durch Gasspektren III 59f.
— — — — Hochfrequenzlinien III 79; IV 210.
— — natürliches System, Tabelle I 27f.
— — Umwandlung durch äußeren Einfluß IV 254f.
— — radioaktive IV 239f.
— galvanische III 227f., 231, 272f., 276f.
— — konstante III 276f.
— Thermo- III 285.
elliptisch polarisiertes Licht III 144f.
Elmsfeuer III 182.
Elongation I 91; II 8.
Emanationen IV 245—248.
Emission (Wellen-) von Atomen II 170f.; III 58f., 77f.; IV 207, 209f.
— und Absorption, Beeinflussung der Schwingungsdauern durch die Umgebung III 58f., 61, 64f., 83.
— — — Zusammenhang II 180; III 68f.
Emissions-vermögen II 181, 182.
—zentren III 59, 81.
Energie I 81—87; IV 259f.
— alle elektrisch IV 263.
—aufspeicherung I 80f.
—bewegung um Wechselstrom IV 112, 118f.
Energie, chemische I 86; II 155f.
— — betrachtet als elektrische II 159; III 274f.
— — unmittelbare Verwandlung in elektr. Stromenergie III 272f.
— — — — — — mechanische Arbeit II 161, 244.
— — — — — — Wärme II 157.
— der Bewegung s. kinetische Energie.
— — Lage s. potentielle Energie.
— des bewegten u. ruhenden Elektrons IV 197f.
— — Lichtes IV 264f.
— Dichte in Strahlung, in Wellen II 255; IV 155.
— — und Druck I 212f.
— Einheit, Arbeitseinheit I 54, 103; IV 25.
— elektrische I 86; III 211 bis 216.
— — Dichte im Felde III 214.
— — Einheiten III 213.
—erhaltung s. Energiegesetz.
—formen I 81—87; IV 262f.
— — einheitlich II 131; IV 262f.
— Gesetz I 80—88.
— — auch für Lebensvorgänge II 160.
— — Prüfung und Bewährung in Anwendungen I 88, 97, 154; II 127—129, 156; III 167, 211, 226, 231, 270, 272f., 279f., 286f.; IV 104 bis 107, 181, 194, 242.
— — und Interferenz II 52 bis 57; III 125f.
— Gewicht, Gravitation derselben IV 161f., 258—260.
— Gravitations- IV 261, 263.
—herbeiziehung bei Wellenabsorption III 83, 127.
— im Atom III 219; IV 242—244, 255, 259f.
— innere Beschaffenheit III 219; IV 263.
— Intensitätsmaß von Wellen II 20, 255; III 11.
—isolation III 85.
— kinetische I 81—83; IV 264f.
— — bei großen Geschwindigkeiten IV 289f.

Energie, kinetische und magnetische Felder IV 264.
— magnetische IV 30f., 100.
— — Dichte IV 31, 101.
—masse, ersichtlich IV 103; berechenbar IV 156f.; alle Masse IV 261f.
— — folgt dem Grundgesetz IV 159, 194.
— potentielle I 81, 83; II 159, IV 262f.
— — der Gravitationskräfte IV 265.
— quantenmäßige Verwaltung durch Atome (Moleküle) II 190—193, 270f.; III 72, 78; IV 187, 199f., 208f., 241.
—regel für Induktion IV 104f.
—Sitz III 213; IV 30, 264f.
— -übertragung durch Wellen II 19f., 176—180.
— — elektrische IV 110, 122.
— — von Leiter zu Leiter bei Wechselstrom IV 116.
— und Äther I 87; IV 262.
— — Amplitude II 32, 255; III 125, 214.
— — Dynamiden IV 229.
— — Kraftlinien III 214 bis 219; IV 30f., 101.
—ursprung die Sonne II 179.
—verwandlung I 83f.
—wanderung (mit und in Kraftlinien) III 213—219, 279; IV 30f., 78, 140, 193, 267f., 287f.
—wegweisung II 52f.; III 125f.
Entfernungsquadratgesetz I 111; II 23; III 11f., 162; IV 6.
Entladen eines Kondensators III 215.
— — Leiters III 177, 190, 198f.
Entladung (elektrische), aperiodische IV 276.
— Energiewirkungen III 210f.
— in verdünnten Gasen IV 162f.
— schwingende IV 123f.
— selbständige IV 218—220.
Entropie II 262f.
— und Wahrscheinlichkeit II 266f.
Entwickeln der Lichtbilder III 75.
Erd-abkühlung II 167.
—ableitung (el.) III 157.
— — Bedeutung III 190.
—abplattung I 109.
—äther III 17, 107—109; IV 50.
—alkalisulfidphosphore III 81f.
—atmosphäre s. Atmosphäre.
—bebenschreiber II 17.
—bebenwellen II 17.
—dichte I 126.
—feld, magnetisches IV 21f.
— — — Horizontalkomponente IV 21, 27—29.
—induktor IV 91f., 94f.
—inneres I 116, 119, 125, 169; II 18, 166, 167, 206.
—magnetismus IV 20f.
—mond s. Mond.
—oberflächentemperatur II 177, 196f., 258f.
—rinde, Alter II 168; IV 249.
—spannungsgefälle (el.) III 200.
—wärme II 167f.
Erde als Kreisel I 135.
— Drehung, absolut nachgewiesen I 136f.; III 20.
— und Mond I 112, 123f.
Erfahrung I 5.
—sätze über Wärme II 88, 147—150, 162f., 171f.
erg I 103; IV 25.
Erregung von Lichtaussendung III 84f.
—sverteilung III 81f.
Erstarrung und Schmelzung II 201f.
Expansionsmaschine II 240.
experimentieren I 5.
Exponentialfunktion I 240; IV 170, 245, 292.
Extrastrom IV 97f.

Fadenkreuz III 51.
Fadenpendel I 90, 93.
Fagott II 80.
Fall-bewegung I 70—77, 209f., 234.
—gesetze I 71, 73, 74.
Farad als Kapazitätseinheit III 179; IV 95.
Faraday's Gesetze der Elektrolyse III 247f., 254f.
Faraday's Ring IV 88.
—scher Käfig s. elektrostatischer Schutz.
Farbe der Jonen III 253f.
Farben des Lichtes III 33f.
— dünner Blättchen III 92f., 143.
— durch Brechung III 35.
— „kalte", „warme" II 173.
— Newtons III 93f., 144, 148.
— und Brechbarkeit III 35f.
Farben-eindruck III 34, 40f.
— -druck, -Photographie III 43.
—eigentümlichkeiten d. Auges III 40.
—glas Newtons III 92.
—ordnungen III 93, 98.
—zerstreuung III 35, 56.
— —stheorie III 66f.
Farbfehler III 46f.
— Beseitigung III 56.
Farbfilm III 43.
farbige Körper III 35, 41.
—s Licht III 34.
Farbstoffgemische III 42.
Federwaage I 103, 143, 195.
Feld, elektrisches III 185f.
— — der Elementarquanten III 189.
— — durch Kraftlinien dargestellt III 185f.
— — Einheiten III 186, 199.
— — Energieinhalt III 212f.
— — homogenes III 193.
— — im Dielektrikum III 206.
— — — Plattenkondensator III 193, 198.
— — induziertes IV 86f.
— — Messung III 185f., 198 200.
— — Stärke III 185, 186.
— — um linearen Oszillator IV 144f.
Feld, magnetisches IV 10.
— — an den Polen IV 10f.
— — durch Kraftlinien dargestellt IV 9f.
— — einer Stromspule IV 56f.
— — Einheit IV 25f.
— — Energieinhalt IV 31, 101.
— — Entwicklung IV 103f.
— — homogenes IV 54, 62.
— — in Eisen IV 16f.
— — Messung IV 27f., 29f., 32, 64, 68f., 88, 90f.

Feld, magnetisches, Stärke IV 10, 12, 59f.
— — um Stromleiter IV 34f.
Felder, elektrische u. magnetische, mechanische Vergleiche III 218f.; IV 18, 71, 281.
— — — Verknüpfung IV 76f., 86.
Feldmagnet IV 61, 108, 111.
Fernkraft I 115, s. auch Gravitation.
—gesetze, elektrisch-magnetische, versagen IV 72f.
Fernrohr, Galilei's III 51f.
— Keplersches III 50f.
— Spiegel- III 52.
Fernsehen IV 186.
Fernsprecher II 76.
feste Flüssigkeitsoberflächen I 192.
Festigkeitskräfte I 142, 147, 151.
Fettfleckphotometer III 12.
Feuchtigkeit, absolute u. relative II 218.
Feuerzeug, pneumatisches II 120, 131; IV 216.
Fixpunkte der Thermometer, Verschiebung II 87, 88.
Fixsternbeobachtungen durch Beugung III 117f.
Fixsterntemperaturen II 197f.
Flächen gleicher Spannung III 199f.
—dichte der Elektrizität III 179f., 188f.
—messung I 22.
—satz I 120f., 127—129.
Flamme als Leiter III 156f.; IV 214—217.
— schallempfindliche II 25.
Flammen-sammler III 200.
—spektren III 59.
Flaschenentladung III 209 bis 211.
— schwingende IV 123f.
Flaschenzug I 60.
Fliehkraft s. Zentrifugalkraft.
Flöte II 80.
Flüchtigkeit II 210.
Flüssigkeiten, Eigenschaften I 163f.
— innerer Druck I 178, 191.
— molekulare Beschaffenheit, Kräfte I 175f.
— — Gruppenbildung III 148.
Flüssigkeiten, überhitzte II 220.
— unterkühlte II 203f.
— Volumelastizität I 174f.
Flüssigkeitsbewegungen, ohne Mitwirkung von Reibung I 208f.
— unter Reibung I 216f., 228f., 243.
Flüssigkeits-druck I 166—168.
—häute I 181, 184f.
—manometer I 195.
—oberfläche, Arbeit zur Neubildung I 192.
— — s. auch Oberflächenspannung.
— — feste Häute an I 192.
— — und Schwere I 164.
— — Verunreinigung I 184, 185.
—säulen I 166—170.
— — mit Temperaturunterschied II 94.
—strahlen I 181, 223.
—unterbrecher III 281.
— -wellen II 12f.
Flugzeuge I 234f.
Fluidum, magnetisches IV 7.
Fluoreszein III 78.
Fluoreszenz III 78f.; IV 154.
— durch Hochfrequenzstrahlen IV 209.
—strahlung der Elemente IV 210.
Fluß, magnetischer s. magn. F.
Flußspatviolett III 75.
Flut s. Ebbe und Flut.
—reibung I 125.
—wirkungen i. Himmelsraum I 126
Fokus s. Brennpunkt.
Formelastizität I 146, 151, 163, 195.
Formel, chemische I 26; III 257.
Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Wellen in Materie II 6, 8, 10, 252—254.
— des Schalls II 21—23, 29f.
— elektrischer Wellen IV 141, 143, 144, 161, 282.
— — — längs Leitern III 215f.; IV 136, 285—287.
— von Licht III 13—16, 21, 32, 39, 103f., 123, 138f.
Foucault's Pendel I 136.
Fourier's Satz II 47.
Fraunhofers Linien III 69f.
Fremdstoffphosphore III 88.
Frequenz II 34.
Fresnels Formeln für reflektiertes und durchgelassenes Licht III 133.
— Lupe III 102.
— Spiegelversuch III 100f., 115.
Fritter IV 149.
Funken, elektrischer III 59, 168f.; IV 123f., 162f., 218—220.
Funkwesen IV 154, 190—192.

Galilei's Energieversuch I 83.
— Fernrohr III 50f.
— Grundgesetz I 68.
— Pendelgesetze I 93f.
— Sätze vom Fall 70f.
Galvanische Elektrizität III 233.
Galvanometer III 234f.; IV 48f.
— als Voltmeter III 243.
— ballistisches IV 51, 273f.
— Dämpfung IV 105f.
— Drehspul- IV 69f.
— Schleifen-, Saiten- IV 68.
— Weicheisen- IV 58.
— zur Elektrizitätsmengenmessung IV 51.
Galvanoplastik III 248.
Gamma-Strahlen IV 241f.
Gangunterschied III 91f., 142.
Gas, Gase, Ausströmen I 210f.
— Bewegungen I 208f., 216f., 220f.
— Bewegungserscheinungen durch Wärme II 106f.
— Dichte und Molekulargewicht II 132f.
— Eigenschaften I 193f.
— Geschwindigkeitsmessung I 212.
— Leuchten III 59f.
— und Dampf II 211—216.
— verdünntes I 194; II 105.
— — Kreisvorgang II 242f., 261f.
— wägbar I 194.
— Wärmeausdehnung einheitlich II 95, 99f.
Gasdruck I 195—204; II 102 bis 106.
Gasgesetze I 198—203; II 212 bis 216.

Gaskonstante II 105f., 259f.
Gasmoleküle, Kräfte, Bewegungen I 194; II 101f., 131f.
Gastheorie, kinetische II 131f.
Gasthermometer II 99—104, 107f.
Gasverflüssigung II 230f.
Gasvolum, Reduktion II 106.
Gauß als Einheit des Magnetfeldes IV 26.
Gay-Lussac-Dalton's Gesetz II 105.
Gedankenversuche I 9, 18, 51, 52; II 127, 180f., 229, 240f., 246—248; IV 157f.
— unerlaubte I 53, 136f.; IV 38, 73, 197.
gefärbte Körper, Wirkung III 41.
Gefäßausdehnung II 93.
Gefrierpunkt s. Erstarrung.
Gefrierpunktserniedrigung II 204.
Gegenkraft I 114f., 121; III 156; IV 6, 66, 160, s. auch Kraft.
— und Kraft stets an Energiemassen IV 159f.
— — — — gleichen Ursprungs I 115.
Gegenstandslinse s. Objektivlinse.
Gegenstandsweite III 47.
Gehörknöchelchen II 49.
Geige s. Violine.
Geist, Geisterwelt I 1, 17, 158, 159; II 134; IV 267f., s. auch Leben.
Geisteswissenschaften I 1f., 7, 13.
Genauigkeitsgrenze I 20.
Geometrie s. Raumlehre.
Geometrische Addition I 37.
— Optik III 8f.
— — Grenzen III 13, 112.
Geräusch II 31, 39, 49.
Geschützrohr, gezogenes I 135.
Geschwindigkeit I 34—39, s. auch Fortpflanzungsgeschwindigkeit.
— Abbildung I 35.
— als Differentialquotient I 39
— Einheit I 35; IV 24.
— stets relativ I 36.
— Zusammensetzung (Parallelogramm) I 36.
Geschwindigkeits-änderung I 39—41, 43, 68.
—gefälle I 228.
—grenze IV 193.
Gesetze s. Naturgesetze.
Gestirne, Helligkeiten u. Durchmesser II 199.
— Inneres I 168f.; IV 156.
— Spektralanalyse III 69.
— Temperaturen II 196f.
— s. auch Himmelskörper, Himmelsmechanik.
Gewicht I 44.
— spezifisches I 45.
— und Masse, proportional I 73, 95, 110; IV 260f.
Gewichtseinheit, Gramm I 44.
— — Festlegung I 171.
Gewitterelektrizität III 224, s. auch Blitz.
Geyser II 97, 220.
Gipskeil III 144.
Gitter der Elektronenröhre IV 190.
— optisches III 119—123.
—spektrum s. Beugungsspektrum.
Glanz s. Metallglanz.
Glasultraviolett III 75.
Gleichgewicht I 47f.
— bei Flüssigkeiten I 163f.
— — Gasen I 193f.
— dynamisches II 209.
— radioaktives IV 248.
— stabiles, labiles, indifferentes I 65.
Gleichgewichts-bedingung I 49.
—lage I 91.
—lagen der Moleküle I 142, 143.
Gleichrichtung von Wechselstrom IV 190f.
Gleichstrom IV 111.
— unterbrochener IV 113, 119.
Gletscher II 206.
— -Brand III 75f.
Glimmlicht, negatives IV 163f., 207, 219.
Glocke II 76.
Glühelektrische Wirkung, Glühelektronen IV 190f., 220.
Glühzustände und Temperaturen II 194.
Golfstrom II 99.
gr im irdischen (technischen) Maßsystem Gewichts- (Kraft-)Einheit I 44, 73; IV 23.
— — absolutem Maßsystem Masseneinheit I 103; IV 22f.
Grad als Einheit der Temperaturstufe II 87, 88, 104f.
Grammkalorie II 112.
Gravitation I 110—119; IV 262—267.
— als Ätherwirkung IV 262f.
— als Fernkraft I 115f., 119.
— der Energie IV 160f., 260 bis 262.
— irdischer Massen I 117.
— Massenproportionalität I 72, 95, 110, 112f.
— und Strahlungsdruck IV 155f.
Gravitations-arbeit II 136.
—energie IV 265.
—feld IV 265.
—gesetz I 111f.
— — Gültigkeitsgrenze IV 265.
—konstante I 118.
—wellen s. Schwerewellen.
Greifbarkeit I 23, 44.
Grenzpfeife II 35.
Grenzwellenlänge (lichtel.) IV 187.
Größen, gerichtete s. Vektorgrößen.
— unendlich kleine I 35.
Größenklassen II 199.
Grundeinheiten I 22.
— für ein verbessertes absolutes Einheitssystem IV 184.
Grundgesetz aller Bewegung I 68f.
— — — Anwendungen und Bewährung (Beispiele) I 70, 92, 106, 109.
— — — Erkenntnis aus der Erfahrung I 70—80.
— — — Gültigkeit auch für materiefreie Energiemassen IV 160f., 194.
Grundgleichungen der Elektrodynamik für ruhende Körper IV 130, 277.
— — Hydrodynamik u. Aerodynamik I 219, 244.

Grundlagen, widerspruchsfreie, des Denkens mit der Natur I XI, 11.
Grundschwingung einer Pfeife II 78.
— — Platte II 76.
— — Saite II 67.
Grundstoffe, chemische, s. Elemente.
Gruppengeschwindigkeit IV 284.
Gültigkeitsgrenzen I 12.

Häufigkeitszone der Nordlichter IV 257.
Häute als Schallquellen II 75.
— von Flüssigkeiten, Haltbarkeit I 182, 185.
Hageldruck I 156.
Halbschatten III 9.
Halbwertszeit IV 245f.
Hall-Effekt IV 68f.
Hallwachs-Effekt, s. lichtelektrische Wirkung.
Handregel IV 34, s. auch elektrodynamischer Zusammenhang.
Harmonie II 35.
Harmonika, Harmonium II 80.
harmonische Tonreihe II 41.
Hasenöhrl's Gedankenversuch IV 157.
Hauptbeben II 18.
Hauptebenen einer Linse III 45.
Hauptschnitt, Definition III 137.
Hauptsätze der Thermodynamik II 244, 262f.
Hauteffekt IV 116, 120, 128, 139, 150, 287.
Heavisside-Schicht, s. Atmosphäre, Leitfähigkeit.
Hebel, Hebelgruppe I 56—61.
Hefnerkerze III 13.
Hefnermeter III 13.
Heißdampfmaschine II 243f.
Heizung II 97, 106, 178, 183, 224.
Helligkeiten der Gestirne II 199.
Henry, Einheit der Selbstinduktion IV 285.
Hertz'sche Wellen s. Wellen, elektrische.
Hertz'scher Oszillator IV 131f.
Herzarbeit I 231; II 160.
heterostatische Elektrometer III 173.
Himmelskörper I 109, 168; II 134; s. auch Gestirne.
— Atmosphären II 136.
— Dichten I 118f.; II 200.
— dunkle, absorbierende IV 258.
— Massen I 113, 118; II 66.
Himmelsmechanik I 110—137.
Hittorf's Umwegrohr IV 219.
Hitzdraht-Strom- und -Spannungsmesser III 283.
Hitzezustand III 83.
Hochfrequenz-Spektrum IV 209f., 236.
—strahlen IV 208f.
— — Eigenschaften III 76, 79; IV 208f.
— — lichtelektrische Wirkung, Trägerbildung IV 189, 209, 213, 222.
— — Wellennatur III 122f.; IV 208.
Hochspannungstransformator IV 121.
Höhenstrahlung IV 258.
Hörbarkeitsgrenze II 34f.
Hörner II 81.
Hörrohr II 28.
Hohlraumstrahlung II 187, 188.
Hohlspiegel III 23f.
Horizontalkomponente (Erdmagn.) IV 21, 27—29.
horror vacui I 196.
Huygens' Prinzip III 30f.
— — für elektrische Wellen IV 142.
hydraulische Presse I 165.
Hydrodynamik I 204f.
— Grundgleichungen I 219, 243f.
— Gültigkeitsgrenzen I 236.
Hydrostatik s. Gleichgewicht bei Flüssigkeiten.
Hygrometer II 218.
Hypothese und Theorie I 10.
Hysteresis IV 20.

Jahr, siderisches, tropisches I 135.
Jahreszeiten I 134.
— Temperaturschwankungen II 166, 258f.
Jamin'sches Interferometer s. Interferenzrefraktor.
idiostatische Elektrometer III 173.
Jenaglasviolett III 75.
Immersion III 53.
Imponderabilien I 4; II 124.
Impuls s. Bewegungsgröße.
Induktion IV 80f.
— durch Bewegung IV 82 bis 85, 106.
— — die Erde IV 91f., s. auch Erdinduktor.
— — Wechselstrom IV 112f.
— elektromotorische Kraft IV 85f.
— Feldstärke IV 86.
— Energieregel IV 104.
— Erzeugung höchster Spannungen IV 121f.
— — stärkster Ströme IV 107f.
— Grundkenntnisse IV 80 bis 87.
— im Äther IV 86, 129.
— in ganzem Leiterkreis IV 87.
— — einfachem Kreis IV 127.
— — geradlinigen Drähten IV 80.
— photochemische III 74.
— und Arbeitsleistung IV 104.
— — Eigenäther der Körper IV 130.
— — elektrodynamischer Zusammenhang IV 79, 84f., 129f.
— — Energiegesetz IV 104f.
— unipolare IV 91.
Induktions-gesetz, drei Formen IV 85f., 106f.
—freie Wickelung IV 96.
—koeffizient, gegenseitiger IV 99.
—linien IV 17.
—strom IV 80f., Richtung 84, 89.
—vorgänge beim Schließen und Öffnen von Strom IV 80—82, 107.
—wirkung auf verdünntes Gas IV 128f.
— — des Oszillators auf den Resonator IV 133.
— — in Motoren IV 109.
Induktor, Induktorium IV 88f., 113, 121f., 129.
Infinitesimalrechnung I 39f.
Influenz III 164f., 191.
—elektrizität III 233.

Influenz, Ladung durch III 166.
— magnetische IV 6.
—maschine III 167f.
—verteilung III 165, 191.
Injektor I 232.
Inklination IV 21.
—snadel IV 9, 21.
innere Reibung von Flüssigkeiten und Gasen I 228f.
— — — Gasen II 139—141.
Instrumente der Musik II 43, 67—70, 75—81.
Intensität des Lichtes III 11f.
— einer Welle II 20, 255.
— von Kathodenstrahlen IV 201.
— — Schall II 32.
—smessung von Wellenstrahlung II 176.
Interferenz als Energie-Wegweiser II 52—55; III 125f.
— an Platten III 92—101; IV 154.
— der Drucke und Bewegungen II 57, 58.
— der Einzelwellen bei Beugung III 110.
— mit Beugung II 53; III 111—125.
— und Energiegesetz II 52f.; III 125f.
—erscheinungen II 50f.; III 89f., 142—149; IV 143, 153.
—platte III 121.
—refraktor III 103f.
—spektroskopie III 120f., 122f.
—versuch, reiner III 101.
—versuche zu Studien über den Äther III 103f.
Intervall, musikalisches II 36 bis 39.
Intuition I 5, 9.
Invar II 90.
Johanniskäfer II 195; III 88.
Jonen III 251f.
— Anlagerungen, Beschaffenheit, Bildung, Größe III 263—265.
— Entweichen und Nichtentweichen III 264.
— und Träger IV 211f., 221f.
Jonen-farbe III 253f.
—ladungen und Valenz III 256f.
Jonen-verdrängung III 271f.
—wanderung III 254f., 260f.
Jonium IV 248, 254.
Joule'sche Wärme s. Stromwärmegesetz.
irdisches Einheitssystem I 44.
Iris s. Regenbogenhaut.
Isolation, elektrische III 156f.; IV 127.
Isomorphie II 155.
isothermisch, Definition II 243.
isothermische Änderungen II 243—247, 262.
Isotop IV 224f., 236, 247f., 254f., 256.
isotrop I 143.

Kabel IV 155, 286.
Käfigwirkung s. elektrostatischer Schutz.
Kälte, -Leitung, -Strahlung II 86, 163, 171.
Kältewirkungen II 205, 225, 230; IV 66, 217.
Kältezustand der Phosphore III 83.
Kaliberfehler II 88, 108.
Kalkspathomboeder III 135.
Kalorie, Wärmeeinheit II 112.
Kalorimeter II 113—116.
Kalorimetrie s. Wärmemengenmessung.
kaltes Leuchten III 78f.
Kanalstrahlen II 66; IV 219, 223f., 226.
— reine Versuche IV 223.
Kantglas s. Prisma.
Kapazität, elektrische III 178f., 202, 204.
— — Dimension IV 45f.
— — Einheiten III 179; IV 95.
— Wärme-, s. spezifische Wärme.
Kapazitätsnormalen, elektrische III 203.
Kapillar-depression I 190.
—fehler I 197.
—waage I 183.
—wellen II 11, 14.
Kapillare Steighöhe I 189f.
Katalysator III 249.
Kathetometer I 22.
Kathode III 246; IV 163.
Kathodenstrahl, Kathodenstrahlen IV 162f., s. auch Elektronen.
Kathodenstrahl, Ablenkungen IV 165, 174f., 179f.
— Absorption IV 170—173, 201—203, 289f.
— — echte und unechte IV 203, 206, 208.
Kathodenstrahlen als Äthervorgänge IV 183f.
— Atomdurchquerung IV 168.
— Ausbreitung in Gasen IV 167f.
— — im Vakuum IV 173.
— „Beugung" IV 170.
— Definition IV 198.
— — der Intensität IV 201.
— Diffusion IV 167f., 172, 198f.
— — geordnete IV 169, 199f.
— Entstehung im Entladungsrohr IV 181, 218f.
— Geschwindigkeit IV 176, 179—183.
— Geschwindigkeitsverlust bei Atomdurchquerung IV 200f., 204—206.
— Interferenz IV 170.
— Ladung und Masse IV 174 bis 179, 183, 192f.
— Lichterregung IV 166, 207.
— Luftleitung IV 177f., 211f.
— Natur derselben IV 173 bis 184.
— Ozonerzeugung IV 166.
— Phosphoreszenzerregung IV 163, 166, 207.
— photographische Wirkung IV 166
— Protonenbefreiung IV 256.
— Reflexion IV 198, 203f.
— reine Versuche IV 165 bis 190.
— Streuung s. Diffusion.
— Trägerbildung s. Elektrizitätsträger.
— Unabhängigkeit IV 164f.
— und Atome (Molekule) IV 168f., 198—210.
— — Magnetnadel IV 183.
— Voltmaß der Geschwindigkeit IV 182f.
— von der Sonne IV 257f.
— Wärmewirkung IV 165, 207.
— Wellenaussendung IV 207f.
Kation III 251.
Keil I 50, 55f.

Kepler'sches Fernrohr III 50f.
Kepler'sche Gesetze I 111f.
Kern des Atoms IV 232f., 243, 251—256.
— — — Eigenvolum IV 232.
— — — Ladung IV 231f.
— -Dynamiden IV 232.
Kerne s. Nebelkerne.
Kernschatten III 9.
Kerr-Effekt s. Doppelbr., el.
Kerzenflamme II 106.
Kette galvanischer Elemente III 228f.
Kilogrammkalorie s. Kalorie.
Kilowatt-stunde III 280.
Kinematik s. Bewegungslehre, reine.
Kinematograph III 77.
kinetische Energie I 81f.; IV 262—265.
— — Berechnung I 82; IV 193f., 290f.
— — Definition IV 264.
— — relativ IV 264.
— — und magnetische Felder IV 264.
— — und Masse bei großen Geschwindigkeiten IV 192 bis 196, 290f.
— Gastheorie II 131—150.
Kirchhoff's Gesetz über Absorption und Emission II 180—183; III 68—71.
— Sätze über Stromverzweigung s. diese.
Kitten I 139.
Klanganalyse II 48, 55, 61f.
Klangfarbe II 32, 44f., 69f.
Klarinette II 35, 80.
Klavier II 35, 69.
Kleinwimmel II 145.
Kleistsche Flasche III 209 bis 213; IV 123f.
Klemmenspannung III 243.
Klima II 116f., 202, 205.
Knallgasvoltameter III 247f.
Knochengerüst I 59, 147.
Knoten der Bewegung und des Druckes II 55f., 71f.
— elektrischer und magnetischer Kraft IV 137f., 142f.
—linien II 75f.
—punkte einer Linse III 45.
Kochsalzwürfel I 140.
Körper I 17.
Körperfarben III 41.
Körpergruppe I 120f.
Koerzitivkraft IV 4, 8, 20, 59.
kohärentes Licht III 98f.
Kohärer IV 149.
Kohlebogen II 194; III 281f.; IV 218f.
Kohlensäure, Druck und Volum I 202; II 215.
Kolben und Zylinder, Arbeit I 215.
Kollektor s. Induktionsmaschinen, Tropfsammler, Flammensammler.
Kollimatorlinse III 48.
Kombinationstöne II 74.
Kometenschweife IV 156.
Komma II 37f., 42, 51.
Kompaß IV 106.
— Kreisel- I 135.
komplementäre Farben III 40.
komplexe Moleküle I 32, II 96, 205, 217, 225, 230, 233; III 264f.; IV 20.
Komplexion II 268.
Komponenten I 36, 49, 62
Kompression, Kompressibilität I 148f., 174f., 203; II 254.
Kondensation II 225f.
—skerne s. Nebelkerne.
—swärme II 222f.
Kondensator, elektrischer, s. Plattenkondensator, Kugelkondensator, Kleistsche Flasche.
Konkavspiegel s. Hohlspiegel.
Konsonanz II 37.
Konstantan III 245.
Kontaktelektrizität III 221f., 233.
Kontrabaß II 35.
Kontraktion I 31; III 109.
Kontrollkraft IV 49.
Konvex-linsen s. Sammellinsen
—spiegel s. Spiegel, erhabene.
Koordinatensystem I 63.
Koppelung, elektrische, induktive, magnetische IV 136.
Kraft, Kräfte I 43, 47, 68, 77.
— Abbildung I 48.
— Angriffspunkt, Angriffsfläche, stets an Massen I 48, 228; IV 160.
— äußere I 120.
— an festen Körpern I 56.
— — Grenzflächen s. Molekularkräfte.
— auf Leiter im elektrischen Feld III 195f., 205f.
Kraft auf Nichtleiter im elektrischen Feld III 207f.
— — Stromleiter im Magnetfeld IV 66—71.
— berechnet aus Energie des Feldes III 216f.; IV 31.
— chemische I 138; III 251f., 268, 272; IV 235.
— Definition I 43.
— Einheiten I 44, 103; IV 23f.
— elastische, fester Körper I 142f.
— elektrische III 184f., keine Fernkräfte IV 147.
— — an Leiteroberflächen III 180.
— — Nachweis durch verdünnte Gase IV 128.
— — und magnetische, keine Fernkräfte IV 147.
— — — — Zusammenhang s. elektrodynamischer Zusammenhang.
— — veränderliche, deren Magnetfeld IV 131.
— elektromotorische III 235.
— — der Selbstinduktion IV 98f.
— — induzierte IV 85f., 113.
— innere I 120.
— in Flüssigkeiten I 164, 229.
— lebendige s. kinet. Energie.
— magnetische IV 9, keine Fernkräfte IV 147.
— — elektrischer Ströme IV 33—43.
— magnetomotorische IV 55.
— nicht relativ I 70.
— normale und tangentiale I 149.
— parallele, Zusammensetzung I 61f.
— -Parallelogramm I 49f.
— pressende bei Reibung I 161.
— und Arbeit II 125f.
— — Gegenkraft I 114f., 121, 128, 228; III 156; IV 6, 66, 159f.
— — — im selben Raumelement, außer bei Gravitation I 114f.; IV 70f.
— — — stets gleichen Ursprungs I 115.
— ungestörte Übereinanderlagerung I 44, 49; III 185; IV 40.

Kraft von Strömen auf Ströme IV 71—75.
— Zusammensetzung, Zerlegung I 49.
Kraftersparnis I 50, 53.
Kraftfeld, magnetisches, der Erde IV 21f.
Kraftlinien III 183, 186; IV 9.
— ähnlich Strömungslinien bzw. Wirbelfäden III 207, 218; IV 18, 78.
— Bewegungsfolgen siehe elektrodynamischer Zusammenhang.
— Dichte ist Feldstärke im materiefreien Raum III 186; IV 12.
— Drängen und Zug verschwinden bei Lichtgeschwindigkeit IV 139f., 146.
— Energie bei Lichtgeschwindigkeit IV 87, 101.
— Energieverteilungen im Äther III 217f.; IV 30.
— Querbewegung mit Lichtgeschwindigkeit durch Drängen III 195, 215f.; IV 143, 146, 280f., 287.
— Schnitte mit dem Äther IV 129, 130.
— umfassende Bedeutung III 183f.; IV 8f., 39, 73f.
— Umformungen III 193f.; IV 144—146, 194—196.
— und Energiewanderung IV 78, 287f.
— — Strahlungsdruck IV 155.
— Ursprung aus Atomen III 219.
Kraftlinien, elektrische III 183f.
— — Eigenschaften III 186 bis 196, 205.
— — Enden III 188.
— — Herstellung der Bilder III 191f.
— — in Dielektriken IV 205 bis 208.
— — — Leitern bei Strom III 237.
— — in sich geschlossene IV 128f., 145.
— — u. elektrische Spannung III 198—204.
— — — Energie III 213 bis 219.
— — — Strom III 241.
Kraftlinien, elektrische, Zahl und Elektrizitätsmenge III 188f., 205.
— — Zeiger III 191f.
Kraftlinien, magnetische IV 8f., 34f.
— — Bewegungen bei Stromänderung nachgewiesen IV 82f., 96, 100, 112.
— — der Elementarmagnete IV 19.
— — Energie IV 30f.
— — Entwickelung IV 76, 103f.
— — Ermittlung IV 10.
— — geschlossen, nie endend IV 12, 17.
— — in Materie (Eisen) IV 14—17.
— — Schnitte induzieren IV 81—85, 129.
— — und Pole IV 10—12.
— — Vervielfältigung durch Eisen IV 19, 55.
— — von Strömen IV 34 bis 42, 53—59, 70, 73—75.
— — — — Zahl und magnetischer Fluß IV 40f., 42, 48, 55.
— — Zeiger IV 9f.
— — und elektrische, gemeinsame Eigenschaften IV 9f.
— — — — Unterschied IV 17f.
— — — — Zusammenhang s. elektrodynamischer Zusammenhang.
Kraftmessung, statische u. dynamische IV 24, 27, 28.
Kreis, magnetischer IV 55, 60.
Kreisbewegung I 104f.
Kreisel I 129—137.
—eigenschaften als Trägheitswirkung I 133.
— — von Magnetstäben IV 57f.
—kompaß I 135.
Kreisstrom IV 41f.
— vervielfältigt IV 48.
Kreisströme der Elementarmagnete IV 57f., 65.
Kreisvorgang II 237f.
Kristalle I 140f.; II 166; III 134—148, 225; IV 65.
— flüssige I 176; III 148.
— optisch einachsige u. zweiachsige III 135f., 139f.
Kristall-gitter I 140; III 122.
—optik III 134—148.
kristallinisch I 141.
Kristallisation I 140.
kritische Temperatur II 231f.
Kugelfehler III 24, 44f.
— Beseitigung III 55.
Kugelkondensator III 187, 202.
Kugellager I 162.
Kundtsches Rohr s. Längswellen, stehende.
Kupferdämpfung IV 106.
Kupfervoltameter III 248, 256; IV 47.

Laden und Entladen von Elektrizitätsleitern III 156, 161, 177, 190, 198.
— durch Influenz III 166.
Ladungs-rückstand III 169.
—schicht an Leiteroberfläche III 177.
—teilung und -verteilung III 177f.
Längen-ausdehnungskoeffizient II 89.
—messung I 19.
Längsdehnung, Längsdilatation I 144f.
Längs- und Querwellen II 9, 11; III 127.
Längswellen, Längsschwingungen II 9, 11f., 17.
— elastische, an Stäben II 74, 252f.
— — in festen Körpern II 16f., 253.
— in Gasen und Flüssigkeiten II 16—19, 27, 254.
— stehende II 57.
Läufer (von Stromerzeugern, Motoren) IV 20, 61, 108f.
Laufgeschwindigkeit von Wellen s. Fortpflanzungsgeschwindigkeit.
Lautsprecher II 76; IV 155.
Leben, Lebensvorgänge I 1, 158, 159; II 134, 160; IV 269, s. auch Geist.
— auf Planeten II 137, 196; III 51.
— und Lichtenergie III 73, 77.
Lebewesen, Entwickelungszeit auf Erden II 168; IV 250, 269f.
Lechersche Wellen s. elektrische Wellen längs Drähten.

Leclanché-Element III 277.
Legierungen I 152; II 90, 204; III 245; IV 66.
Leimen I 139.
Leistung, Definition I 163.
— der Naturforschung I 11.
— elektrische III 280.
— Einheiten I 163; III 280.
Leistungsmöglichkeiten der Materie II 134.
Leiter, Elektrizitätsverteilung III 174—182.
— I. u. II. Klasse III 225 bis 227, 232.
— körperliche III 246, 281.
— Laden und Entladen s. Laden.
—oberfläche, Verhalten der Elektrizität III 180.
—querschnitt, Stromverteilung III 237; IV 116, 287.
— und Nichtleiter der Elektrizität III 156f.
Leitung, el., s. Elektrizitätsleitung.
Lenz'sche Regel s. Induktion, Energieregel.
Leuchten, kaltes II 158; III 77—88.
— von festen, flüssigen Körpern II 183—192; III 58, 61.
— — Gasen III 60f.
Leuchterregung III 84, 85.
Leuchtstärke, Einheit III 13.
— Messung s. Photometrie.
Leuchttiere II 195; III 88.
Leydener Flasche s. Kleist'sche Flasche.
Libelle s. Wasserwaage.
Licht III 3—7f.
— Absorption III 58, 64f.
— Ausbreitung III 8f.
— — in Kristallen III 134 bis 142.
— Aussendung, Emission II 192; III 58f., 122, 127; IV 160, 206, 226.
— — im elektrischen Feld, im Magnetfeld IV 238.
— — und deren Erregung III 84f.
— Brechung III 26—28, 32.
— — in Luft III 34.
— einfarbiges, monochromatisches, spektrales III 37f., 62, 96.
Licht, Intensität III 11f.
— ist Wellenvorgang, Nachweis III 89—148.
— — — im Äther III 3f.
— kohärentes III 98f.
— polarisiertes III 128f.; IV 153.
— Transversalität III 128, 129.
— u. Elektrizität, Zusammenhang IV 52, 143, 148f.
— — Lichtempfindung III 3, 34.
— — Materie III 58f.
— unpolarisiertes, natürliches III 130.
— Verspätungen im Himmelsraum III 21.
— weißes III 36f.
— Wirkungen III 71f.; IV 153.
— zirkular und elliptisch polarisiertes III 144f.
Lichtbildkammer III 50.
Lichtbildnerei III 74f.
Lichtdruck IV 155f., 159f.
Lichtelektrische Photometrie IV 185f.
— Wirkung, Kathodenstrahlen IV 185f.
— — auf Gase IV 187, 213.
— — — Metalle und Spannungsreihe IV 189, 214.
— — d. Hochfrequenzstrahlen IV 186, 189, 209, 213, 222.
— — Energieursprung IV 188f.
— — und Intensität d. Lichtes IV 186f.
— — — Wellenlänge d. Lichtes IV 187f.
Lichtgeschwindigkeit III 13 bis 15 s. auch Fortpflanzungsg.
— elektrischer Wellen IV 143f., 280f., 286f.
— Grenzgeschwindigkeit III 67; IV 146, 192f., 284.
— gut gesichert III 15.
— stets bezogen auf Äther III 16—21.
— Studien durch Interferenzversuche III 103f.
— und el. Einheitsverhältnis IV 52, 282.
— — Wellenlänge III 39f.
Lichtjahr III 21.
Lichtmühle II 176.
Lichtquanten nicht im Licht III 126 s. auch quantenmäßiges Arbeiten d. Atome.
Lichtquellen, monochromatische III 63, 98.
— Temperaturen II 194.
Lichtsumme III 83.
Lichtstrahl III 5, 8, 30, 112.
— Krümmung bei der Sonne III 13; IV 160f., 261.
— Richtungsfestigkeit I 137.
— u. Kathodenstrahl IV 182f.
Lichtwellen III 5, 6; IV 152.
— Beweis der elektromagnetischen Natur IV 151.
— Inneres untersuchbar IV 153f.
— Messung durch Gitter III 116f.
— — — Ringe III 96.
— — — Spiegel III 102.
— stehende IV 154.
— und Atome III 126.
Linien-fluoreszenz III 79.
—spektrum III 59f. s. auch Spektrallinien.
—spektrum der Hochfrequenzstrahlen IV 209.
— — u. Aggregatzustand III 58f.
Linsen III 43f.
— achromatische III 57.
— bringen keinen Gangunterschied III 54.
—bilder III 47f.
—dicke III 44.
—fehler III 44f., 55f.
—gleichung III 47.
—systeme III 55f.
Lippenpfeifen II 77f.
Lochkammer III 10f.
Lösungen II 204; III 264, 270 s. auch komplexe Moleküle.
— Dampfspannung, Siedepunkt II 217, 222.
Lösungsmoleküle III 264.
Löten I 139.
longitudinale Welle s. Längswelle.
Lorentz-Kontraktion s. Kontraktion.
Loschmidtzahl II 143.
Lotabweichung zur Gravitationsmessung I 110.
Lüftung II 107.

Luft-bläschen, Dampfspannung II 229.
—blasen, flache I 188.
—elektrizität III 200, 224; IV 257.
—pumpen I 197f., 207, 231, 232.
—schiffe I 198, 234; II 106.
—thermometer s. Gasthermometer, Differentialthermometer.
—verflüssigung II 233f.
Luminszenz s. Leuchten, kaltes.
Lupe III 50.
— Fresnel'sche III 102.
Lure II 81, 82.
Lux III 13.

Magnet IV 4, 59.
— und Strom IV 66—71.
Magnetfeld, Definition IV 10 s. auch Kraftlinien, magnetische.
— der Erde IV 21f.
— Einheit IV 25f.
— Energieinhalt IV 30f., 101.
— höchste Stärken IV 59—61.
— homogenes IV 54.
— im Innern von Eisen IV 16f.
— Messung IV 27—30, 88.
— veränderlicher elektrischer Kräfte IV 131.
— von Strömen IV 34—42, 53—59.
Magnetinduktion IV 82f.
magnetische Dämpfung IV 105f.
— Doppelschicht IV 56.
— Drehung der Polarisationsebene IV 90.
— Energie IV 30f., 100f.
— Influenz IV 6.
— Koppelung IV 136.
— Kräfte s. Kräfte, magn.
— Kraft und Stromstärke proportional IV 50f.
— Kraftlinien s. Kraftlinien, magn.
— Ohm-Gleichung IV 55f.
— Steighöhe III 217; IV 30, 32, 64.
— Störungen des Erdfeldes IV 257.
— Strommessung IV 43f.
— Stromwirkungen IV 33 bis 75, 279f.
magnetische und elektrische Energie stets verknüpft IV 76f.
— Wellen IV 136, 146, 283.
— Wirkungen bewegter Ladungen IV 49f.
magnetischer Fluß IV 18, 19, 35, 42, 55f.
— — Dimension IV 56.
— — eines Stromes IV 40f., 56.
— Kreis IV 55, 60.
— Schutz IV 16f.
magnetisches Drehfeld IV 121.
— Fluidum IV 7.
— Moment IV 25f.
— — einer Spule IV 56.
— Verhalten von Eisen IV 4, 6—8, 14f., 19f., 22, 58, 65.
Magnetisieren IV 4f., 7f., 59.
Magnetismen und Pole IV 4f., 6f.
Magnetismus aller Materie IV 57, 62f.
— Theorie Ampère's IV 57.
— und Bindungen der Atome IV 65f.
— — Elektrizität, Zusammenhang IV 33f., 76f.
Magnetkraftlinien s. Kraftlinien.
Magnetnadel IV 9, 20.
magnetomotorische Kraft IV 55.
Magnetstab, gedreht IV 91.
— Kräfte IV 28f.
Magnetstein IV 4.
Manganin III 245.
Manometer I 195 s. auch Druckmessung.
— magnetisches IV 64.
Mariotte's Gesetz s. Boyle-Mariotte's, Gesetz.
Maschinen I 50—61, 165.
Masse I 42; IV 261f.
— des Elektrons IV 179, 183, 193, 197.
— Einheiten I 72, 74, 103; IV 22f.
— Geschwindigkeitsabhängigkeit, -unabhängigkeit IV 160, 183, 194—196, 263 bis 265, 290.
— ist Energie IV 157—161, 261.
— Messung durch Wägen I 72.
Masse, Messung nach Definition I 42.
— und Gewicht s. Massenprop. d. Schwerkraft.
— Verteilung im Atom IV 232, 243f.
Massen, Zusammenwirken ungestört I 43.
—proportionalität d. Kathodenstrahlabsorption IV 171 bis 173, 201f.
— — — Kathodenstrahldiffusion IV 169, 172.
— — — Schwerkraft, Gravitation I 72f., 95, 110, 112f.
— — — Sekundärstrahlmenge IV 204.
— — — Zentrifugalkraft I 107.
—spektroskopie IV 224f.
Maßsysteme s. Einheiten.
Materialismus I 13.
Materie I 4.
— allgemeine Eigenschaften I 17—46.
— Aufbau aus den Atomen I 30.
— Grundzahlen III 260.
— Leistungsmöglichkeit II 134.
— und Energie I 87; IV 261f.
— und Licht (Ätherwellen) III 58, 88.
Mathematik I 7, 10.
— Grundkenntnisse derselben genügen zum Naturverstehen I XIII.
— mangelhaft I 117, 183; III 183.
— weitergehende wesentliche Anwendungen I 246f.; II 47, 135; III 66; IV 277f.
mathematische Beweise I 10.
Maulweite II 77.
Maxwells Gleichungen I 10; IV 130f., 144f., 277f.
Mechanik, Prinzipe I 89.
mechanisches Wärmeäquivalent II 127—130.
Medium einer Welle II 6, 8; III 26.
Meeres-strömungen II 98f.
—wellen II 14, 15.
Mehrphasenstrom IV 120.
Membran als Schallquelle II 75.
Mengeneinheiten, elektrische III 163; IV 24, 46, 47f.

Menistus I 188f.
Meridian, magnetischer IV 21.
Mesothor IV 248.
Messen I 5, 6, 19.
Meßbügel für Oberflächenspannung I 183.
Metall, Atome und Elektronen III 226; IV 189, 216, 217.
— Auflösung in Säure III 270f.
— Elektrizitätsleitung III 161, 194, 217.
— wirksames, in Phosphoren III 81.
—barometer I 197.
—dämpfe II 151.
—glanz III 29, 67.
—manometer I 195.
—thermometer II 90.
Metazentrum I 172f.
Metronompendel I 102.
Meter I 19f.
Michelsonversuch III 107f.
Mikrofarad III 179.
Mikrometerschraube I 21.
Mikrophon II 45, IV 154.
Mikroskop III 53f.
— Grenzen der Leistung III 53f., 116.
— zum Messen I 21.
Milchstraßensystem III 21.
Minimum der Ablenkung III 33.
Mitführung, optische III 104f.
— von Wärme durch Strömung II 98, 107, 162.
Mittellinie, optische III 141.
Mitschwingen s. Resonanz.
— bei Ätherwellen III 65 bis 69, 71f.; IV 142, 154.
Mischkalorimeter II 111, 113.
Mitteldynamiden IV 235.
Mittelwert, quadratischer II 135.
Modulation II 42.
Modulierte Welle IV 155.
Molekül (Molekel) I 26.
—abstand in Gasen II 139, 144.
— Eigenvolum I 201; II 137, 142f.
— freie Weglänge II 137f., 144.
— Atomzahl und spezifische Wärme II 122f., 154.
—radius, gaskinetischer II 137, 141.
Molekül, Spektrum III 59; IV 225.
—stöße I 155, 156; II 101.
—strahlen II 135; IV 238.
—zahl in Gasen II 132, 142f. s. auch Loschmidtzahl.
— Zersetzung s. Dissoziation.
— — in der Entladungsröhre IV 225.
Moleküle, Anziehungskräfte s. Molekularkräfte.
— Durchmesser, Radien I 29, 142—144.
— elektrische Ladungen in denselben III 250f.
— Gesamtvolum II 142.
— große I 159; II 134; III 55.
— komplexe s. Komplexe M.
— quantenmäßiges Arbeiten s. dieses.
— Untersuchung durch Dielektrizitätskonstanten-Messung III 209.
Molekular-Bewegung II 130, 145, 147, 170, 267.
— — Brown'sche s. Kleinwimmel.
—gewicht I 27.
— — Bestimmung II 132, 133, 134, 204, 222.
—geschwindigkeit I 211.
—kräfte I 138—142; IV 228.
— — an Grenzflächen I 185f.
— — Angriffspunkte I 140; II 144; III 61.
— — bei festen Körpern I 142, 143.
— — — Flüssigkeiten I 139, 163f., 175—178, 231; II 224; III 265.
— — — Gasen I 193f., 201 bis 203; II 103, 127, 234.
— — — Lösungen (komplexen Molekülen) III 264.
— — elektromagnetische I 141; III 224f.
— — und chemische Kräfte I 141; III 258.
—lokale Temperaturen II 157; III 86, 87; IV 214.
—luftpumpe I 232.
—magnete s. Elementarmagnete.
—wärme II 150, 153.
molekulare Querschnittssumme II 142.
Moll II 37.
Moment s. Bewegungsgröße.
— magnetisches IV 25f.
Momentanzustand, oberer und unterer III 83.
Mond I 112, 123f., 125; II 136f.
— Dichte I 126.
—ringe III 122.
monochromatisches Licht III 37f., 63, 98.
Motoren s. Turbinen, Wärmemotoren, Elektromotoren.
Multiplikatoren IV 48f., 106.
Musik II 35—43, 49—51, 82 s. auch Instrumente.
— Schreibweise II 42.
— Tonumfang II 35.
Muskel, -Arbeit, -Kräfte I 43, 59, 157—159; II 160f.
— Zucken durch Elektrizität III 169; IV 127.

Nachwirkung, elastische I 142.
— thermische II 90.
Nadelbündel, Reflexion III 25.
Nadelschatten III 112.
Nähewirkung IV 215f., 218.
Nahrungsmittel II 159f.; III 73.
Natur-anschauungswert von Gesetzen und Bildern IV 73.
— Denken mit der I XIII.
— ein allzusammenhängendes Ganzes I XII, 11.
—forschung, Vorgehen I 5 bis 10.
— — Wert I 11.
—gesetze, Auffindung und Sicherung I 8f.
—wissenschaft, Abzweigungen I 2f.
— — und Geisteswissenschaften I 1f.
Nebel II 226, 230.
—flecken I 126, 129; III 21, 70; IV 257.
—kerne II 226—230.
— — Bildung, Quellen II 227f.; III 77.
— — Größeneinfluß II 228f.
—methode, -spurmethode IV 222, 231f., 255f.
—tröpfchen II 226f.
Nebenschluß III 244.
Neptun errechnet I 117.
Nerven I 158.

Netzhaut des Auges III 41, 49.
Neue Sterne II 200.
Neutralisation, elektrische III 158f.
Neutron IV 234.
Neutronenstrahlen IV 257.
Newton's Bewegungsgesetze I 69, 114.
— Farben III 93f., 144, 148.
— Farbenglas III 92.
— Gravitationsgesetz s. dieses.
— Ringe III 94—98, 100 f.
Nickelin III 245.
Nicol'sches Prisma III 137.
Niederschlag, aktiver IV 246f.
Nonius I 21.
Nordlicht I 204; IV 257f.
Nordpol von Magneten IV 5, 21, 22.
Normaldruck bei Flüssigkeiten I 178, 191f.
Normalelemente III 277; IV 95.
Normalkerze III 13.
Normalkilogramm I 44, 171.
Normalkondensator III 203.
Normalton a II 40.
Normalzustand eines Gasvolums II 106.
Nullpunkt, absoluter II 104, 235f.; IV 66.
Nutation I 134.

Oberflächen-dichte, elektrische III 179f.
—kräfte bei Flüssigkeiten, -spannung I 177—195.
— — an Wand I 186.
— — Ausbildungszeit I 192.
— — und innerer Druck I 191.
— — — Temperatur I 193.
— — wohlgeprüft I 190f.
—wellen II 12—14.
— — Entstehung II 14f.
Obertöne, Oberwellen II 47f.
— der Pfeifen II 79.
— — Saiten II 68.
— — Stäbe und Stimmgabel II 72—74.
— harmonische II 41.
— und Klangfarbe II 48.
Objektive der Fernrohre III 50f., 56.
Oboe II 80.
Öltransformator IV 122.
Oersted's Entdeckung IV 33.
Ofenheizung II 106f., 178.
Ohmbestimmung IV 95.
Ohm-Gleichung, elektromagnetische IV 54f.
Ohm's Gesetz III 235f., 242, 270, 280.
— — bei veränderlichem Strom IV 99.
Ohr II 48f.
— Empfindung der Klänge II 46f.
— Energieempfindlichkeit II 32f.
— Hörgrenzen II 34f.
Oktave II 36, 38f.
Okularlinse III 50.
Optik, geometrische III 8—56.
— — Grenzen III 13, 112.
optisch „dicht" und — „dünn", Definition III 27.
— positive, — negative Kristalle III 140.
optische Achse III 136.
— Geräte III 43f.
— Mitführung III 104f.
— Mittellinie III 141.
— Pyrometrie II 193f.
ordentlicher Strahl, Definition III 136.
Ordnungen im Gitterspektrum III 119f.
— Newton'scher Farben III 93f.
Ordnungszahl I 27; IV 210, 225.
Orgel II 35, 79.
Osmose, osmotischer Druck I 207f.; II 134.
Oszillator (elektr.) mit Kleist'scher Flasche IV 123f.
— dauernd schwingender IV 191.
— geradliniger (linearer) IV 131f., 149.
Oxydkathode s. glühelektrische Wirkung.
Ozon, Bildung durch Licht III 76f.
— — — Kathodenstrahlen IV 166.

Paradoxon, hydrostatisches I 168.
Paraffinkondensator IV 178f.
Parallaxenbeobachtungen III 21.
Parallaxenfehler I 21.
Parallelogrammsatz, Gültigkeit, Sinn I 36—38.
Paramagnetismus s. Magnetismus.
Partialdruck II 216.
Passat II 107.
Pechblende, Pecherz IV 239, 249.
Peltier-Effekt III 287.
Pendel-bewegung I 90—103.
— elastisches I 91, 95.
—gesetze I 93—96.
—länge, reduzierte I 95f., 101.
—schwingung, Kraftgesetz I 91f.
— Schwingungsdauer I 92, 101, 240f.
—versuch von Foucault I 136.
— zusammengesetztes I 97f., 101f.
Periode s. Schwingungsdauer.
Periodische Eigenschaften, periodisches System der Elemente I 277; III 257; IV 251f.
Permeabilität IV 15f., 19f., 62—66.
— abhängig von Feldstärke und Temperatur IV 20.
Perpetuum mobile I 51f., 55, 84f.; II 149f.
Pfeifen II 76—81.
Pferdestärke I 163.
— elektrische III 280.
Pflanzen, Hochsteigen der Säfte I 190.
— und Sonnenlicht III 73f.
Phasen I 91; II 8, 9; III 30.
— der Bewegung und — des Drucks II 27.
— Umkehr bei Reflexion II 27; III 95.
— — elektrischer Kraft bei Reflexion IV 141f., 153f.
Phlogiston II 124.
Phonograph II 44.
Phosphore, Phosphoreszenz III 81—87.
Phosphoroskop III 87.
photochemische Induktion III 74.
Photoeffekt s. lichtelektrische Wirkung.
Photographie s. Lichtbildnerei.
photographische Kammer s. Lichtbildkammer.

Photometer, Photometrie III 12; IV 185f.
Photonen II 193; III 127.
Physik I 1.
— angewandte, technische I 11.
— theoretische oder mathematische I 8.
physiologische Wirkungen des elektrischen Stromes III 254; IV 127.
— — — Lichtes III 77.
Piezometer I 174.
Pikelflöte II 35, 80.
Planeten, Bewegung I 110 bis 113, 122.
— Entstehungsweise I 126.
— Störungen I 116.
— Temperaturen II 196f.
Planimeter I 22.
Platten als Schallquellen II 75.
— kondensator III 193, 197, 201, 202, 217.
— planparallele III 34.
— satz III 131.
Pluto errechnet I 117.
Pneumatisches Feuerzeug II 120, 131; IV 215.
Poissonsche Konstante (elastische Konstante μ) I 145.
Pol, Pole IV 4, 11, 18.
— nie einzeln IV 7.
— stärke, Einheit IV 6, 12, 25.
Polarisation des Lichtes bei Reflexion und Brechung III 128—134.
— — — — Doppelbrechung IV 134—139.
— — — zirkulare und elliptische III 144f.
— dielektrische III 165, 208f.
— elektrolytische, -Spannung, -Strom III 268—270.
— elektrischer Wellen IV 150.
Polarisations-ebene, Drehung III 149f.
— — — im Magnetfeld IV 90f.
— mikroskop III 148.
— winkel III 131.
Polarisator III 131f., 137f.
polarisiertes Licht, Schwingungsrichtung III 129f.; IV 153f.
Polarstern I 134.
Polonium IV 247f.
Polschuhe IV 61.
Polymerisation II 96, s. auch komplexe Moleküle.
Posaune II 81.
positive Säule IV 162f., 220.
— Strahlen IV 223f.
Positron IV 230.
Potential, elektrisches III 168.
Potentialtheorie I 116; III 174, 183, 191.
Potentielle Energie I 81, 83; IV 261, 263f.
Präzessionsbewegung I 130, 132, 134.
Presse, hydraulische I 165.
Prinzipe der Mechanik I 89.
Prisma III 33f.
— achromatisches, geradsichtiges III 55.
— Nicolsches III 137.
— zur Bildaufrichtung III 50.
Probescheibchen III 181.
Pronyscher Zaum s. Bremsdynamometer.
Proportionen, Gesetze der konstanten und multiplen — I 26.
Protactinium IV 248.
Proton IV 229f.
— Befreiung durch α-Strahlen IV 255f.
— — — Kathodenstrahlen IV 256f.
— Masse ist Energiemasse IV 261f.
Protonenstrahlen IV 256.
Protoplasma I 159; II 134.
Pulswelle II 15f.
Punkt, fester I 39.
— kritischer II 215, 231f.
— leuchtender, Definition III 9.
Pupinspule (Verbesserung von Kabeln) IV 286.
Pyknometer I 45.
Pyrheliometer II 179.
Pyrometrie, optische II 193.

Quadrantelektrometer III 173.
quantenmäßiges Arbeiten der Atome und Moleküle s. Energie, quantenmäß. Verwaltung.
„Quantentheorie" II 193.
Quart II 39.
Quarzglasviolett, Quarzkristallviolett III 75.
Quarzuhr IV 193.
Quecksilber, Atomwärme II 153.
— Dampfspannung II 210, 212.
— gleichrichter IV 191.
— luftpumpen I 197.
— thermometer II 86f., 107f.
Quer-kontraktion, Querschrumpfung I 144f.
— mitnahme der Lichtstrahlen in bewegten Körpern III 106.
— — — — — Äther fehlend III 18, 20f.
— schnitte der Atome, absorbierende III 127; IV 201f., 290.
— — — — gaskinetische II 142.
— und Längswellen II 9, 11; III 128.
Quincke's Umwegrohr II 54.
Quint II 37—39.
QUS-System IV 46f.

Radialgeschwindigkeit von Gestirnen II 65.
radioaktive Elemente IV 238, 242—248, 251.
— Isotope IV 252f.
— Strahlen IV 238—241.
— Umwandlung IV 241 bis 253.
radioaktiver Zerfall im Erdinnern und auf der Sonne II 168; IV 256.
radioaktives Gleichgewicht IV 248f.
Radioaktivität IV 238—257.
— künstliche IV 254f.
Radiometer II 176.
Radium IV 239, 244f.
— Emanation IV 244.
Ra A, B, C, C', C'', D IV 246f.
Radon IV 244.
Räume, hohlverbundene I 169.
Raman-Effekt III 79.
Randstrahlen bei Hohlspiegel III 23.
— — Linse III 54.
Randwinkel I 186f.
Rauch II 145, 227.
Raum I 17—19.
— akustik II 29.
— elemente I 63
— erfüllung von Materie u. Äther I 17f., 30; II 4, 137—139, 142f.; IV 229.

Raum, leerer s. Vakuum.
—lehre I 18.
—messung I 21, 22, s. auch Volum.
— raumfreier II 145.
— schädlicher I 197; II 240.
—vorstellung I 18.
— und Äther, Unterschied IV 267f.
Reaktions-leuchten III 87f.
—wärme II 156f.; III 251.
Reduktion eines Gasvolums I 201; II 106.
— einer Quecksilbersäule I 197.
Reduktionsfaktor, ballistischer IV 274.
— der Tangentenbussole IV 44.
reelle Bilder bei Linsen III 47f.
— — Definition III 11.
Reflektor s. Spiegelfernrohr.
Reflexion elastischer Körper I 146.
— von α-Strahlen IV 231.
— — Kathodenstrahlen IV 198, 203f.
— — Licht (elektr. Wellen) III 22—26; IV 137, 141 bis 143.
— — — Lichtmenge III 29, 132.
— — — macht Polarisation III 130f.
— — — metallische, selektive (auswählende) III 29, 42, 67, 145.
— — — totale III 27f.
— — Schall II 25—29.
— — Wellen (aller Art) II 28; III 29—31.
— — — an dünnerem, dichterem Medium, Phasenumkehr II 26f.; III 95; IV 141f., 153f.
— — — — rauhen Grenzflächen II 28f.; III 25.
Reflexions-gesetz I 146; II 27; III 22f., 31f.
—mechanismus bei elast. Wellen II 25—27.
Refraktion, atmosphärische III 34.
Refraktometer III 28.
Refraktor s. Fernrohre Galileis und Keplers.
Regelation des Eises II 206f.
Regenbildung, Regentropfen I 235; II 226f.
Regenbogen III 38, 122.
—haut des Auges III 54.
Register der Orgel II 79.
Regulierwiderstand III 237.
Reibelektrisiermaschine III 155, 168, 233.
Reibung (Kraftart) I 159f., 228.
— als Wärmequelle I 85; II 125.
— der Ruhe I 160.
— gleitende, rollende I 159 bis 163.
— innere bei Flüssigkeiten und Gasen I 228—231; II 139 bis 141.
— Wirkung auf Flüssigkeits- und Gasbewegungen I 218, 220, 224, 232—236, 243f.
Reibungs-elektrizität III 155f., 222f.
—koeffizient, -konstante I 161, 229—231.
Reine Versuche s. Versuche.
Reinstoffphosphore III 87.
Rekombination s. Wiedervereinigung.
Relativität s. Bezugsmäßigkeit.
„Relativitätsprinzip", „Relativitätstheorie" I IX, X, IV 265.
Remanenz IV 4, 8, 20, 59.
Resonanz II 60—62; IV 132ff., s. auch Absorption durch Mitschwingen.
—boden, -kasten II 70.
—strahlung III 80.
Resonator II 61f.; IV 132f., 149.
Resultierende I 36, 49.
Reversibilität s. Umkehrbarkeit.
Reversionspendel I 102.
Rheostat s. Widerstand.
Rhomboeder des Kalkspats III 135.
Richtkraft s. Direktionskraft.
Richtung, feste I 135—137.
Riemenübertragung I 60.
Riesensterne III 118.
Ringanker IV 61f., 108.
Ringe Newton's III 93f.
Röhren, kommunizierende, s. Räume, hohlverbundene.
Röntgenstrahlen s. Hochfrequenzstrahlen.
Rolle I 50, 60.
Rotationsdispersion III 149.
Rotverschiebungen der Spektrallinien II 65.
Rückdiffusion IV 204.
Rückstandsladung III 169, 209.
Ruhelage I 91.
Ruhenergie IV 264.
Ruhmasse des Elektrons IV 193, 197, 290.
Rundfunk IV 154.

Saftanstieg in den Pflanzen I 190.
Sättigung mit Dampf II 219.
— — Magnetismus IV 8, 20.
— von Lösungen III 265.
Säule, positive IV 162f., 218.
— Volta's III 227.
Saiten II 67—70.
—galvanometer IV 68, 70.
Salzsäurebildung durch Licht III 76.
Sammellinsen III 42f.
Schall (und Schallempfindung) II 3.
— Absorption II 30.
— bei Bewegung von Quelle und Beobachter II 63f.
— drahtlose Übertragung IV 154.
— Druck II 62f.
—empfindliche Flamme II 25.
— Fortpflanzung in festen und flüssigen Körpern II 29f.
— Geschwindigkeit II 21—23, 30, 134f.
— getragen vom Wind II 24.
— intensität II 20, 32f., 255.
— — absolute Messung II 63.
—isolierstoffe II 30.
—quellen II 67—81.
— Sammlung und Verbreitung II 23f., 28.
—stärke s. -intensität.
—strahlen II 24f.
—übertragung in dünne Gase II 21.
— Wellenvorgang in Materie, Nachweis II 21—30.
—wellen II 18f., 254.
— — als Gitter III 122f.
Schaltungsweisen von Stromquellen III 238.

Schatten III 8—10.
Scheinwerfer III 25, 48.
Scherung I 149.
Schichtung im Entladungsrohr IV 162f., 220.
Schiebleere I 21.
Schiefe Ebene I 50f.
— — Fall auf derselben I 76.
Schießpulver II 159.
Schirmwirkung, elektrodynamische IV 115, 128, 150.
— elektrostatische III 165, 175f., 201.
— magnetische IV 16f.
Schlagweite zu Spannungsmessung III 172.
Schleifengalvanometer IV 68, 70.
Schliere II 98, 106; III 57.
Schlitteninduktor IV 88.
Schmelzen und Erstarren II 201—207.
Schmelz-kalorimeter II 113 bis 115.
—punkt II 201, 203.
— — Erniedrigung II 204.
— — und Druck II 205f., 246.
—wärme II 202f.
—zusatz III 81.
Schmiermittel I 162.
Schneckengetriebe I 61.
Schneidenton II 77.
Schraube I 50, 55f.
— ohne Ende I 61.
Schraubentaster I 21.
Schutz, elektrodynamischer, elektrostatischer, magnetischer s. Schirmwirkung.
—ring III 201, 203.
Schwachstrom-Technik IV 59.
Schwarzer Körper II 175, 182f., 187f.; III 42.
Schwebungen II 50.
— von Obertönen II 51.
Schwebungston II 74.
Schweigezone II 25.
Schweißen I 139.
Schwere (eine Kraft) I 43—46.
—beschleunigung I 73.
— — Messung mit Pendel I 96, 102.
—druck I 166—169.
—pendel I 90—97, 101, 102.
— Sonderfall der Gravitation I 112, 115f.
—wellen II 11, 13f.
Schwerkraft, abhängig von geogr. Breite und Höhe I 103, 110, 116.
— als Resultierende vieler Einzelkräfte I 115.
— massenproportional I 72, 95, 110.
Schwerpunkt I 61—65, 120f.
— Ermittlung I 63f.
Schwerpunktsachsen I 100, 122f.
—satz I 120—127, 153f.
Schwimmen I 171—174.
Schwingung, Schwingungen (Pendel) I 90—97, 238f.
— aufeinander senkrechte II 58f.
— elastische I 95; s. auch Schallquellen.
— elektrische IV 122—125, 131—134, 275f.
— — ungedämpfte, Erzeugung IV 191f.
— — Wechselstromeigenschaften IV 126f.
— gedämpfte I 230, 238.
Schwingungs-bäuche und -knoten II 56f., IV 138, 143.
—dauer I 92—96, 101, 238f.; II 33; IV 125, 276.
— — Definition I 92.
—ebene (-richtung) des Lichtes III 128; IV 153f.
— — — — in Kristallen III 137f.
—weite s. Amplitude.
—zahlen, Einheit II 33.
— — hörbare II 34f., s. auch Töne.
— — von Licht III 39.
—zustand s. Phase.
Seele I 1, 158, s. auch Geist.
Sedimentärgesteine I 169.
Sehen III 77.
— stereoskopisches III 49.
Sehweite, normale deutliche III 53.
Seifenblasen I 181f., 184f.; III 92, 95.
Seilwellen II 6, 10, 26, 254.
Seismograph II 17.
sek, Zeiteinheit in allen Maßsystemen I 32f., 44, 103.
Sekund II 41.
Sender IV 155, 193.
Sekundärstrahlung IV 204 bis 207, 213f., 219f., 225.
— direkte, differentiale IV 204f.
— fester Körper IV 206.
— Menge IV 204—206.
— totale IV 206, 212.
— und Trägerbildung IV 211f.
Sekundärstrom IV 80f.
Selbstinduktion IV 96—103.
— Koeffizient IV 98f.
— Trägheitserscheinung IV 101—103, 114, 123.
Selbstinduktion, Wirkung bei Wechselstrom und Schwingungen IV, 114, 117f., 126.
selektive Absorption III 41, 64f.
— Reflexion III 42, 67.
Selen-Photometer IV 187.
semipermeabel I 207.
Sensibilisierung III 74.
Septime II 41.
Serien-formeln, -konstante III 63f.; IV 236f.
—spektren s. Spektralserien.
Sext II 39.
Sieden, Siedepunkt II 207, 219—222.
Siedepunktserhöhung II 134, 222.
Silber-salze am Licht III 74.
—voltameter III 248, 256; IV 47.
Sinnesempfindungen und deren Deutung I 5—11; II 85.
Sinus-bewegung, -schwingung I 93, 238.
— und Winkel I 92.
—welle II 8f.
— — longitudinale II 19.
Sirene II 34—38.
Skale s. Tonleiter.
Skineffekt s. Hauteffekt.
Solarkonstante II 179.
Solenoid IV 53.
Sonne II 136, 195f, 197.
— chemische Analyse III 69f.
— Energiequelle II 178—180, 197f.; IV 159.
— Kathodenstrahlen, Ultraviolett II 228; III 75; IV 213; 257f.
— Masse I 114.
— Temperatur III 197f.
— und Erdtemperatur II 177f., 196f.

Sonnen II 198—200; III 51, s. auch Doppelsonnen.
—finsternis III 10.
—flut I 124.
—spektrum III 69f.
—tag, -zeit I 33.
Sonometer II 52.
Spannkraft s. potentielle Energie.
Spannung (elektrische) III 168—174, 198—204.
— Ausgleich s. Entladung.
— Bestimmtheit bei Berührung III 221.
— Definition, Maß III 168, 170, 199.
— Einheiten III 172; IV 24, 93f.
— Gefälle III 199, 241.
— induzierte IV 85f.
— Messung III 167f., 172 bis 174, 201, 243, 283; IV 50, 70.
— Sitz und Ursprung in den Elementen III 229, 231.
— und Elektrizitätsmenge III 172, 178, 204.
— — Kraftlinien III 198f., 201.
— — Strom, Ausbreitung an Leitung III 215f., IV 285f.
— Verteilung im Raum III 199f.
— — — Stromkreis III 229f., 240—242.
— wie Gasdruck III 170f., 179, 201.
Spannungsreihe, Volta's III 225—227, 252, 267, 271f., 275, 285; IV 189, 216.
Spate als Polarisatoren und Analysatoren III 137f.
Spektral-analyse III 59f., 65f., 69f.; IV 210.
—apparat, Spektroskop III 54f.
—linien III 54.
—serien III 62f.
spektrale Lichter III 39.
Spektrum III 35f.
— aller Wellenlängen II 173f.
— der Hochfrequenzstrahlen III 122; IV 209f.
— durch Beugung III 115, 117—123.
— — Prisma III 35, 53f., 55.
— kontinuierliches III 55.
Spektrum, Massen- IV 224.
— reines III 37f., 54.
spezifisches Gewicht I 45.
— — des Wassers und Eises II 95.
spezifische Wärme II 110 bis 113, 150f.
— — der Gase II 118—123, 150—154.
— — — — Verhältnis II 58, 121—123, 152, 153f.
— — Einheit II 113.
— — fester und flüssiger Körper II 116f.
— — negative II 197.
— — u. Temperatur II 117f.
sphärische Aberration s. Kugelfehler.
Spiegel III 22—24.
— als Polarisator und Analysator III 131f.
—bilder II 28; III 22f.
—fernrohr III 53.
—versuch Fresnel's III 101f., 115.
Spiralnebel I 126; III 21.
Spitzen-entladung, -wirkung III 181f.; IV 218, 220.
—zähler IV 220, 241.
Sprengstoffe II 158.
spröde I 152.
Spulen s. Stromspulen.
Stab als Schallquelle II 71 bis 75.
— elastische Längswelle II 12, 252.
stabiles Gleichgewicht I 65.
Ständer, Standmagnet eines Motors, Stromerzeugers IV 61, 108, 120f.
Stahl, magnetisches Verhalten IV 4, 8.
—magnet, Herstellung IV 59.
Start-Effekt IV 238.
Statik s. Gleichgewicht.
stationärer Vorgang I 209; II 164.
Staub II 145, 226f.; IV 221.
Stefan's Gesetz II 187, 246f., 265.
Steifigkeit (Trägheitswirkung) I 132.
Steighöhe durch Oberflächenspannung I 189.
— magnetische III 217; IV 31f., 64.
Steinkohlenzeit II 197; III 73.
stereoskopisches Sehen II 50f.
Stern-tag I 32.
—schnuppen I 204, 211.
Steuerruder I 235.
Stevin's Gedankenversuch I 51.
Stimmgabel II 72.
— Interferenzen II 52.
Stimmorgan der Tiere und Menschen II 81.
Stimmung, reine, temperierte II 35, 43.
Stöpselkasten s. Widerstandskasten.
Störungen, erdmagnetische IV 257.
Stoff-wahn I 13.
—welt I 1.
Stokes' Regel III 78f., 82.
Stoß I 152—159.
— Berechnung, Grundlage I 154.
— der Gasmoleküle II 101.
— elastischer I 153—155.
—ton II 74.
— unelastischer I 85, 153f.; II 129, 131.
—zeit I 152, 155.
Strahl, Strahlen einer Welle II 24; III 8f., 13, 30.
— elektrischer Kraft IV 148.
— Flüssigkeitsstrahl, Gasstrahl I 181, 223.
— ordentlicher und außerordentlicher III 136.
— positive IV 223—226.
Strahlung, Ausbreitungsform der Wärme II 170—177.
— charakteristische IV 210.
— Druck IV 155f.
— durchdringende IV 258.
— Energieübertragungsmittel II 178—180.
— radioaktive IV 239—243.
— schwarzer Körper II 185.
Strahlungsgleichung II 189, 190.
Strich, doppelter IV 4.
Strom (elektrischer), Begriff und dessen Festhaltung III 230f., 279; IV 49f.
— Erzeugungsmaschinen s. Dynamomaschinen.
— in Elektrolyten III 254.
— in Gasen IV 210—222.
— — Metallen III 161, 194; IV 68.
— Kraftlinien s. diese.

Strom, Kraftwirkungen s. Kraft, Kräfte.
— Spulen IV 53—59, 69, 74f.
— Stärke III 232.
— — Einheiten III 232, 248, 291; IV 43—47.
— — Messung III 234f., 244, 247f., 283; IV 43f.
— und Flüssigkeitsstrom III 236, 237; IV 101f.
— — Spannung, Ausbreitung an Leitung III 215f.; IV 285f.
— -Unterbrecher III 281; IV 89.
— veränderlicher, und Ohm's Gesetz IV 99, s. auch Wechselstrom.
— Verteilung im Leiterquerschnitt III 237; IV 116, 287.
— Verzweigung III 244f.; IV 119.
— Waage IV 74.
— Wärmegesetz III 278.
— Wirkungen III 233.
— — chemische III 246—278.
— — magnetische IV 33—75.
— — Wärme III 278—284.
Stromelemente, Gesetz IV 37 bis 39, 72f.
Strömung, Ausbreitungsform der Wärme II 97f., 107, 162.
Strömungslinien (Stromlinien) I 220—225, 227, 237.
— bei Wärmeleitung II 257.
Strukturformel III 257.
Sublimation II 220.
Südpol von Magneten IV 5, 21, 22.
Summationston II 74.
Supraleitung IV 216.
Synchronmotor IV 193.
Szintillation, Phosphoreszenzerregung durch α-Strahlen IV 241.

Tag I 32f.
— und Nachtgleichen I 134.
Tangentenbussole IV 41, 43.
Taupunkt II 218.
technische elektrische Einheiten IV 46f.
Teilbarkeit I 23f.
Teildrucke II 216f.
Teilmaschine als Längenmeßinstrument I 20.
Telefon II 76.
Telegraphie und Schallübertragung, drahtlose IV 149, 154f., 191f.
— elektromagnetische IV 59, 285f.
Teleskop s. Fernrohr.
Temperatur II 86, 101, 102.
— absolute II 99, 104f.
— der Fixsterne II 198.
— — Planeten II 196.
— — Sonne II 195, 197.
—fixpunkte II 87, 203, 223.
—gefälle II 163, 172.
— Grenzen der Anwendbarkeit des Begriffes II 158; III 86.
— kritische II 231—233.
—leitung II 170, 258.
—messung II 86—89, 96, 100—104, 107—109, 193f.
— molekular-lokale II 157, 186; III 86, 87; IV 214.
—schwankungen an Erdoberfläche und im Inneren II 166, 177f., 258f.
—skalen II 87f., 99, 104f.
—strahlung II 174, 186.
— tiefe II 235; IV 66, 217, s. auch Kältewirkungen.
— und Glühzustand II 193f.
— Verteilung in Atmosphäre II 178, 261.
—zustände bei Phosphoren III 83f.
Tertiärstrahlung IV 205, 219.
Terz II 39.
Theorie und Hypothese I 10.
Thermodiffusion II 145.
Thermodynamik II 244.
thermodynamische Skale II 104.
thermoelektrische Wirkung III 284—288.
Thermoelement II 108; III 285—288.
Thermometer II 86—89, 96, 107—109.
— Differential- II 176.
— Gas- II 103f.
Thermometrie s. Temperaturmessung.
Thermophon s. Wackler.
Thermosäule II 171, 176; III 285—288.
Thomson-Effekt III 286.
Thoraktinium IV 248, 253.
Thorium, Thorgruppe IV 239, 254.
— Emanation (Thoron) IV 248.
— Zerfall IV 248.
Tilgung der Phosphore III 86f.
Ton-arten II 42.
— film II 45.
—höhe II 33—43.
—leitern II 39f., 43.
—reihe, harmonische II 41.
—stärke II 32.
—stufen, Intervalle II 36—39.
—umfang musikalischer Instrumente II 35.
Töne dreifach verschieden II 32.
— mit dem Ohr nicht wahrnehmbare II 34f., 58.
— Schwingungszahlen II 33 bis 43, 63f.
— — Ermittelung II 34, 52, 61.
— und Geräusche II 31, 49f.
Torricelli's Ausflußsatz I 208 bis 211.
— Versuch I 196f.
Torsion I 149.
Torsionsmodul I 150.
Totalreflektometer III 28.
Träger (el. in Gasen) IV 211, 220f.
— allerkleinste und ganz große IV 221.
— Bildung IV 211—217, 221f.
— Bildungsspannung IV 205, 212.
— Größenermittelung II 147; IV 211.
— in der Atmosphäre IV 257f.
— — heißen Gasen IV 214 bis 216.
— mehrfach geladene IV 221.
— Sichtbarmachen durch Dampfkondensation IV, 222.
— und Ionen der Elektrolyse IV 212, 221f.
— Wanderungsgeschwindigkeitsmessung IV 211, 213, 215.
— Wiedervereinigung IV 212, 215.

Trägheit I 41—43.
— der Energie s. Energiemasse.
— wirkt gegen Kräfte I 106, 132f.
Trägheits-energie IV 263 bis 265.
—gesetz I 41, 47, 69, 121.
—kräfte I 106.
—moment I 99—101, 242.
Transformator IV 116—119, 122, 275.
transversal s. quer.
Transversalität der Lichtwellen s. Licht.
Trennungsleuchten (Triboluminescenz) III 225.
Tripelpunkt II 206.
Trocken-Element III 277.
—säule III 229.
Trommel-anker IV 61, 108.
—fell II 49.
Trompete II 81.
Tropfen, Bildung, Schwingungen I 178, 181, 188.
Tropfsammler III 200.
Tuba II 81.
Turbinen I 213f.
Turmalinzange III 138, 148.

Überblasen der Pfeife II 79.
Überhitzung II 214, 220f.
Überlichtgeschwindigkeit III 68; IV 146, 284.
Übermikroskop IV 174.
übersättigter Dampf II 227.
Übersetzungsverhältnis I 50f., 55, 56, 58, 61.
Uhren I 33f., 94, 96f.; II 90.
Ultramikroskop III 54.
Ultrarot II 173—176, 190, 195; III 86.
— Sichtbarmachung III 86f.
Ultraschall II 35, 75.
Ultraviolett III 75f.
— Sichtbarmachung III 79.
— Trägerbildung in Luft IV 187, 213.
Umgebungsdynamiden IV 234.
Umkehrbarkeit von Vorgängen II 238—240, 266.
Umladung von Atomen in Flammen und Kanalstrahlen IV 216, 224.
Umsetzungswärme, Reaktionswärme II 156f.; III 253.
Umwegrohr, Hittorfs IV 219.
— Quincke's II 54.
Undurchdringlichkeit der Materie I 23, 31, 169; II 138.
Unendlich kleine Größen I 35.
Ungeordnetheit der Wärmebewegung II 85, 266f.
unipolare Induktion IV 91.
unpolarisiertes Licht III 130.
Unruhe s. Uhren.
Unterkaltung II 203f.
unterkühlter Dampf II 227.
Uran IV 239f.; 248.
— Pendel IV 260.
— Spaltung V 257.
— Strahlen IV 238 f.
— Zerfall IV 248, 253.
Uräther III 20f.; IV 268.
Urmetermaßstab I 20.

Vakuum, leerer Raum I 194, 196; III 3f.
—spektograph III 121.
Valenz s. chemische Wertigkeit.
—dynamide IV 235.
—elektron s. Elektronen.
van der Waals' Gleichung I 201f.; II 106, 214—216.
Vektorgrößen I 35.
— Zusammensetzung I 37f., 48f.
Verbindung, chemische I 26.
Verbrennungswärme II 156f.
Verdampfbarkeit II 210.
Verdampfung II 207—225.
Verdampfungswärme, Verdichtungswärme II 222 bis 225, 245.
Verdichtung von Dämpfen II 225—230.
Verdunstung II 207—218.
Verdunstungsgeschwindigkeit II 217f.
Verflüssigung der Gase II 230 bis 236.
Verformungen, elastische I 143.
Vergrößerung eines Fernrohres III 51.
— — Mikroskops III 52.
Verrückung, virtuelle I 55.
Verschiebung, dielektrische III 164f., 208.
Verschiebungssatz der Wellenlängen II 189.
Verschluckung des Lichtes s. Absorption.
Verstärkerröhre IV 192.
Verstehen der Natur I XIV, 7—11.
Versuche, reine, und Beispiele ihrer Förderlichkeit I 5, 71; III 59, 101; IV 165—180, 187, 190, 223, 240.
Verteilung der Elektrizität auf Leitern III 174—182, 188f.
Verwandlung, Umwandlung, von Elementen s. Elemente, chem., Umwandlung.
— — — Energie I 83—86; IV 266f.
Verzahnung I 60.
Verzögerung I 40.
Verzweigung von Strömen s. Strom.
Vierklang II 39.
Violine II 35, 70.
virtuelle Bilder III 11, 23, 24, 47.
— Verrückungen, — Arbeit I 55.
Viskosität s. Zähigkeit.
Vokalwellen II 45f.
Volt, Spannungseinheit III 172.
— Maß für Geschwindigkeit von Elektronen IV 182f., 291.
—messer III 243.
— Ursprung, Verwirklichung IV 93—95.
Volta-Element III 227—229, 272f., 277.
—induktion IV 82.
—meter III 247f.
Volta's Grundversuch III 220f.
— Spannungsreihe s. diese.
Volta'sche Elektrizität III 233.
Volum, Volummessung I 22, 45f., 171, 198.
—änderungen beim Schmelzen II 205.
—ausdehnung II 92—96.
—elastizität I 148f., 151, 164, 174f.
— — von Gasen II 254.
— und Druck bei Gasen I 198 bis 204.
Vorbeben II 18.
Vorgelege I 60f.
Vorstellungen, Begriffe I 7, 9.

Waage I 59.
— elektrische III 201.
— Empfindlichkeit I 66, 67.

Wackler II 92.
Wägbarkeit I 44.
Wärme-äquivalent, mechanisches I 85f.; II 127—129.
—ausbreitung II 162—193.
— — in festen Körpern II 162 bis 168.
— — — Flüssigkeiten II 97 bis 99, 168f.
— — — Gasen II 106f., 169f.
—ausdehnung II 89—107.
—ausdehnungskoeffizient, linearer, kubischer, scheinbarer und wahrer II 89, 92—95.
—bewegung I 142f., 205f.; II 85, 130—155, 266 bis 270.
— eine Energieform I 85f.; II 126f.
— Erfahrungssätze II 88, 147 bis 150, 162, 163, 171f.
—inhalt von Körpern II 111f.
— -Isolation II 165, 170, 183.
—kapazität s. spezifische Wärme.
—leistungen in den Körpern II 150—154.
— Leitung II 162—170.
— — Theorie II 165, 256 bis 259.
— — und elektrische Leitung II 165f.
— Menge, Einheit, Messung II 110—116.
—motoren II 92, 107, 237 bis 248.
— Natur derselben II 124 bis 131.
—quellen II 159, 177—180.
—sinn II 85f.
— -Speicherung II 116; III 226.
—-Stoff II 85, 124, 130, 162.
—-Strahlung II 170—200.
—-Strömung, Mitführung II 97—99, 106f.
—theorie, mechanische, siehe Thermodynamik.
Wahrheit, Wahrheitswert der Naturforschung I X, 11.
Wahrscheinlichkeit, Definition II 267.
— bei Elementzerfall IV 245f.
— und Entropie II 266—271.
Wanderung kraftgetriebener Partikel II 145—147.
Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen III 260—263.
— von Elektrizitätsträgern IV 210, 212, 214f.
Wanderwelle IV 148.
Warmwasser-Heizung II 97.
Waschwirkung der Seife I 182.
Wasser-batterie III 229.
—dampf in Erdatmosphäre II 218, 226.
—fallelektrizität III 223f.; IV 221.
—kalorimeter II 113.
—kreislauf II 179.
—luftpumpe I 231f.
—motoren I 213ff., 216.
—oberfläche, elektrische Doppelschicht III 223.
— Polymerisation s. komplexe Moleküle.
— schweres IV 225.
— spezifische Wärme II 112, 116, 117.
— spezifisches Gewicht, Dichtemaximum II 95f., 98.
— thermische Eigentümlichkeiten I 175; II 95f., 116f., 202, 205, 225.
— Waage I 22.
—wellen II 5, 10f., 12—15.
— — Ölwirkung I 185.
—wert II 113.
Wasserstoff, Atomgewicht, absolutes II 142—144.
— Molekulargewicht II 133.
— schwerer IV 225f.
Watt, elektrische Leistungseinheit III 280.
Weber = Ampère, Stromeinheit, Definition IV 46.
— Namengebung III 291.
—windungszahl IV 48, 54f.
Webers Theorie des Diamagnetismus IV 89f.
Wechselfeld und Eisen IV 20.
Wechselstrom IV 111—122.
— Energieübertragung von Leiter zu Leiter IV 116.
— Erzeugung IV 111.
— Form IV 112.
— Gleichrichtung IV 189f.
— Induktionswirkungen IV 112—119, 274f.
— Kraftlinien- und Energiebewegung IV 112, 118f.
— Messung IV 111.
— Phasen IV 112f., 120f.
Wechselstrom, Selbstinduktionseinfluß IV 114f., 117f.
—-Umformer (Transformator) IV 116f., 121f.
— — Stromstärkenverhältnis in den beiden Spulen IV 275.
— Verstärkung IV 191f.
— Widerstand IV 114, 119f.
Wechselzahl IV 111.
Weg I 34.
—elemente I 39, 41.
—länge, freie der Moleküle II 137f., 140f.
Wehnelt-Unterbrecher s. Flüssigkeitsunterbrecher.
Weicheisengalvanometer IV 58.
Weißes Licht III 36f.
Wellen II 4—20, s. auch Schall, Licht, Lichtwellen, elektr. W., magn. W.
— elastische in festen Körpern II 16f., 253.
— elektrische und elastische, Vergleich IV 284f.
— Energieträger II 19f., 177 bis 180.
—fläche, -front, -ebene II 8, 251; III 30.
—flächen von Licht in Kristallen III 139—141, 148.
—form II 7, 44—50, 251; III 89.
— Fortpflanzungsgeschwindigkeit s. diese.
—fronten von Licht, nachweisbare III 103, 120, 124f.
—gleichung II 251f.
— harmonische II 9.
—länge II 8.
— longitudinale und transversale s. Längs- und Quer-Wellen.
—medium, Definition II 6.
—optik III 89—150.
— Seil- II 6f., 10, 25—27.
—skale (Äther) nach Großoktaven II 174; IV 153.
— stehende II 55—58; IV 137 bis 140, 143f.
—-Telegraphie IV 149, 154f., 191f., 258.
— Umwandlung in Elektrizitätsquanten IV 262.
—zerlegung II 47f.; III 35 bis 40.

Wellenzug II 7.
Wellrad I 50, 59f.
Welt einheitlich beschaffen I 112; III 70f.
— materielle I 1.
—raumstrahlung IV 259.
Wertigkeit s. chemische W.
Weston-Element III 276.
Wheatstonesche Brücke s. Widerstandsmeßbrücke.
Wichte s. spezif. Gewicht.
Wicklung, induktionsfreie, bifilare IV 96.
Widder, hydraulischer I 216.
Widerhall II 25.
Widerstand, elektrischer III 236—238.
— — innerer und äußerer III 238.
— — parallel und hintereinander III 244.
— — spezifischer III 237f.
— — Temperatureinfluß III 245, 266; IV 217.
— gegen Bewegung in Gasen und Flüssigkeiten I 232 bis 236.
— magnetischer IV 55f., 58f.
Widerstands-einheiten III 239, IV 45, 46, 94f.
—kasten III 239; IV 96.
—messung III 239f., 244f.
—meßbrücke III 244f.
—thermometer II 108; III 245.
Wiedervereinigung der Träger IV 212, 215.
Wille, freier I 158.
Wind, -mühlen II 107.
—hose I 109, 226.
Windungsfläche IV 57.
Winkel am Einheitskreis I 66.
—beschleunigung I 98.
—geschwindigkeit I 98.
Wirbel, -faden, -linie, -ring I 225—228.
—ströme IV 105f.
—sturm I 109, 226.
— vermeidende Form I 234.
Wirklichkeit I X, 7f., 11, 52.
Wirkungsgrad von Wärmemotoren II 238, 241—244, 261f.
— — Muskeln II 161.
—quant II 191.
—querschnitte der Atome IV 202f.
—weite, -kugel, der Molekularkräfte I 139, 184, 192.
Wismut-gruppe IV 254.
Wismut im Magnetfeld IV 63f., 68f., 90.
—spirale IV 30, 69.
Wolken II 226f.
—streifen II 15.
Wurfbewegung I 78—80.

zähe I 152.
Zähigkeit I 230.
Zählrohr IV 220.
Zählung von Atomen II 154; IV 220, 240.
— — Elektronen IV 219, 240.
Zamboni-säule s. Trockensäule.
Zeeman-Effekt IV 238.
Zeit I 32.
—einheit I 32—34.
—elemente I 41.
—messung I 34.
Zellen im Pflanzen- und Tierkörper I 159, 208.
Zentren, Phosphoreszenz- III 81.
— — als elektrische Resonatoren III 82.
Zentrifugalkraft I 104—110.
— Berechnung aus d. Grundgesetz I 107.
— gegen Schwere arbeitend I 105.
— massenproportional I 107.
Zentrifugal-pumpe, -ventilator, Zentrifuge I 109, 243.
Zentripetalkraft I 104f.
Zerfall von Atomen IV 242 bis 250.
— — — Änderungen der Eigenschaften dabei IV 250 bis 254.
Zerfalls-konstante IV 245f.
—reihen IV 243—248, 253.
Zersetzung durch Wärme II 154.
Zersetzungsspannung III 266 bis 268.
Zersprühen elektrisch wirksam III 224.
Zerstreuungslinsen III 44.
Zertrümmerung von Atomen s. Elemente, chem., Umwandlung.
Ziehkraft s. Zentripetalkraft.
zirkular polarisiertes Licht III 144—146.
— — — und optische Drehung III 150.
Zitter-aal, -rochen III 229.
Zug, Definition I 143.
—festigkeit I 142, 145, 151.
— von Kraftlinien, Definition III 196.
Zungen, -pfeifen II 80f.
Zurückwerfung s. Reflexion.
Zusammen-drückbarkeit I 31, s. auch Kompressibilität.
—drückung s. Kompression.
—hang, elektrodynamischer IV 76—80.
—klänge II 35—39.
— — Wellenformen II 38f.
—setzung von Geschwindigkeiten I 36f.
— — — Kräften I 48f., 61f.
— — — Vektorgrößen I 37f.
—ziehung einer rotierenden Masse I 128f.
Zusatz-energie IV 266f.
—kräfte der Mechanismen I 53.
Zustände der Materie I 138.
Zustands-änderung, adiabatische, isothermische II 243, 259—261.
—gleichung, erweiterte II 106, 214—216.
— — verdünnter Gase II 105.
Zykloidenpendel I 96.
Zyklotron IV 193.
Zylinder und Kolben, Arbeit I 215.

Geh. Rat Prof. Dr. Philipp Lenard

Deutsche Physik

in vier Bänden

I. Band: Einleitung und Mechanik. 3. Aufl. 1942. 263 S. Mit 113 Abbildungen und 11 Tabellen. Geh. Mk. 8.80, geb. Mk. 9.80.

II. Band: Akustik und Wärmelehre. 3. Aufl. 1943. 281 S. Mit 88 Abbildungen und 24 Tabellen. Geh. Mk. 7.80, geb. Mk. 8.80.

III. Band: Optik und Elektrizitätslehre I. Teil. 3. Aufl. 1943. 300 S. Mit 115 Abbildungen. 13 Tabellen. Geh. Mk. 8.20, geb. Mk. 9.20.

IV. Band: Elektrizitätslehre II. Teil. 3. Aufl. 1943. (Magnetismus, Elektrodynamik, Kathodenstrahlen, Radioaktivität, Energie, Gravitation, Äther.) 327 S. Mit 122 Abbildungen und 5 Tabellen. Geh. Mk. 8.80, geb. Mk. 9.80.

„Den Lehrern in deutschen Schulen aller Art stellen die vier Bände die Gesamtheit des gesicherten Wissens der Physik in einheitlicher, zusammenhängender Darstellung zur Verfügung, zur Auswahl für den Unterricht... Dem ernsten Leser gibt das Werk unzählige Hinweise und Ausblicke auf noch zu Erforschendes, und doch kommt nirgends ein fremdrassiger Gedanke zur Geltung.
Es ist besonders bemerkenswert, daß diese arische, deutsche Physik weit weg führt von einer materialistischen, mechanistischen Naturauffassung, die als Überbleibsel aus der Zeit der Enzyklopädisten noch vielfach der Physik anhaftete."

Deutsche Wissenschaft, Erziehung und Volksbildung.

Von Geh. Rat Prof. Dr. Philipp Lenard erschien ferner:

Große Naturforscher

Eine Geschichte der Naturforschung in Lebensbeschreibungen.

6. Auflage 1943. Mit 70 Abbildungen. Geh. Mk. 7.—, geb. Mk. 8.20.

Lenard beschreibt Leben und Taten folgender großer Naturforscher: Pythagoras, Euklid, Archimedes, Hipparch, Leonardo da Vinci, Kopernikus, Tycho Brahe, Stevin, Galilei, Kepler, Torricelli, Pascal, Snell, Des Cartes, Guericke, Mariotte, Boyle, Roemer, Huygens, Newton, Leibniz, Papin, Bradley, Black, Watt, Scheele, Priestley, Cavendish, Coulomb, Galvani, Volta, Rumford, Klaproth, Dalton, Gay-Lussac, Humboldt, Davy, Berzelius, Young, Fraunhofer, Fresnel, Orstedt, Laplace, Ampère, Carnot, Ohm, Gauß, Faraday, Wilhelm Weber, Julius Robert Mayer, Joule, Helmholtz, Clausius, Thomson, Darwin, Bunsen, Kirchhoff, Maxwell, Hittorf, Crookes, Stefan, Boltzmann, Hertz und Hasenöhrl.
Sein Buch gehört zu den seltenen Werken, die sowohl dem Naturwissenschaftler als auch dem Laien wertvolle Erkenntnisse und reiche Anregungen bieten."

Math.-Naturwissenschaftl. Blätter.

J. F. Lehmanns Verlag / München 15